

**UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID**

**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR**



**PROYECTO FIN DE CARRERA**

**INGENIERÍA INDUSTRIAL**

**SIMULACIÓN DE INCENDIOS  
EN CENTRALES DE GENERACIÓN ELÉCTRICA  
MEDIANTE CÓDIGO FDS**

**Autor:** Miguel Ángel de Lucas Hernández

**Directora:** Guadalupe Vadillo Martín

**Tutor:** Víctor Amezcua Pérez

**DEPARTAMENTO DE MECÁNICA DE MEDIOS CONTINUOS  
Y TEORÍA DE ESTRUCTURAS**



# Índice

<b>1.</b>	<b><i>INTRODUCCIÓN</i></b> .....	<b>1</b>
1.1.	OBJETIVOS Y MOTIVACIONES.....	3
1.2.	LIMITACIONES Y APROXIMACIONES.....	4
<b>2.</b>	<b><i>ANTECEDENTES</i></b> .....	<b>5</b>
2.1.	MSCI- MODELOS DE SIMULACIÓN COMPUTACIONAL DE INCENDIOS .	7
2.2.	CLASIFICACIÓN DE LOS MSCI .....	8
2.2.1.	Modelos de zona .....	8
2.2.2.	Modelos de campo.....	10
2.3.	VALIDACIÓN DE LOS MSCI.....	13
2.4.	SOFTWARE UTILIZADO .....	18
2.4.1.	Características y capacidades del programa seleccionado .....	18
2.5.	BASES TEÓRICAS DE FDS .....	23
2.5.1.	Modelo Hidrodinámico.....	23
2.5.2.	Modelo de Combustión.....	24
2.5.3.	Modelo Pirolítico.....	29
<b>3.</b>	<b><i>DESARROLLO DE METODOLOGÍA</i></b> .....	<b>33</b>
3.1.	METODOLOGÍA GENERAL .....	34
3.1.1.	Formulación del problema del incendio.....	34
3.1.2.	Definición de los objetivos específicos en la Simulación .....	35
3.1.3.	Recopilación de datos e información del incendio simulado .....	35
3.1.4.	Elección del modelo. Verificación y validación .....	35
3.1.5.	Diseño, realización y análisis de los experimentos .....	36
3.1.6.	Documentación y resumen de los resultado de la simulación .....	36

<b>3.2.</b>	<b>DESCRIPCIÓN DE ESCENARIOS DE FUEGO.....</b>	<b>38</b>
3.2.1.	Configuración del compartimento.....	38
3.2.2.	Identificar las cargas de combustible primarias y secundarias .....	38
3.2.3.	Parámetros de ventilación .....	39
3.2.4.	Fuentes de ignición.....	39
3.2.5.	Sistemas y actividades de extinción .....	39
3.2.6.	Objetivos (targets) y mecanismos de fallo.....	39
3.2.7.	Acciones del personal y vías de evacuación .....	40
<b>3.3.</b>	<b>TIPOS DE ESCENARIOS DE FUEGO .....</b>	<b>41</b>
3.3.1.	MEFS (Maximum Expected Fire Scenarios).....	41
3.3.2.	LFS (Limiting Fire Scenarios) .....	41
<b>3.4.</b>	<b>NÚMERO DE ESCENARIOS A MODELAR .....</b>	<b>42</b>
<b>3.5.</b>	<b>ESCENARIOS POTENCIALES EN CENTRALES ELÉCTRICAS .....</b>	<b>43</b>
<b>4.</b>	<b><i>PARÁMETROS MÁS CARACTERÍSTICOS DE UN FUEGO .....</i></b>	<b>45</b>
4.1.	HRR (Heat Release Rate) .....	45
4.1.1.	HRR en combustibles líquidos .....	47
<b>5.</b>	<b><i>ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.....</i></b>	<b>49</b>
5.1.	DESCRIPCIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL VOLUMEN DE CONTROL.....	50
5.2.	PARÁMETROS ANALIZADOS.....	51
5.3.	VARIACIÓN DE BURN_RATE_MAX.....	53
5.4.	VARIACIÓN DE LA SUPERFICIE .....	55
5.5.	VARIACIÓN DEL ESPESOR.....	57
5.6.	VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA AMBIENTAL .....	58
5.7.	VARIACIÓN DEL CAUDAL DE EXTRACCIÓN .....	59
5.8.	VARIACIÓN DEL CALOR DE VAPORIZACIÓN .....	60

---



5.9.	VARIACIÓN DEL TAMAÑO DE MALLA .....	61
6.	<b>SIMULACIÓN DE INCENDIO DE UN TRANSFORMADOR .....</b>	<b>63</b>
6.1.	ESPECIFICACIONES .....	63
6.2.	UBICACIÓN Y NORMATIVA DE SEGURIDAD.....	64
6.3.	CONDICIONES AMBIENTALES.....	67
6.4.	DESCRIPCIÓN DEL ESCENARIO DE SIMULACIÓN .....	68
6.4.1.	Geometría del volumen de control .....	68
6.4.2.	Identificación de las cargas de combustible .....	70
6.4.3.	Parámetros de ventilación .....	72
6.4.4.	Identificación de las fuentes de ignición .....	74
6.4.5.	Sistemas y actividades de extinción .....	74
6.4.6.	Objetivos y puntos de medida .....	75
6.5.	RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN Y CONCLUSIONES .....	76
6.5.1.	HRR del fuego .....	76
6.5.2.	Temperaturas y velocidades de los gases de la llama .....	78
6.5.3.	Temperaturas de los gases tras el muro cortafuegos .....	79
6.5.4.	Temperaturas del muro cortafuegos .....	80
6.5.5.	Temperatura superficial del transformador auxiliar .....	86
6.5.6.	Temperatura superficial de las barras de fase aisladas .....	87
6.5.7.	Concentraciones de O <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> y CO en el edificio eléctrico .....	88
6.5.8.	Visibilidad en el edificio eléctrico .....	90
7.	<b>TRABAJOS FUTUROS Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>91</b>
	<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>93</b>
	<b>ANEXO I - Fichero de entrada de FDS.....</b>	<b>95</b>
	<b>ANEXO II - Manual Rápido de Utilización de FDS versión 4.0.6 .....</b>	<b>109</b>



## 1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día la simulación computacional desempeña un papel muy importante en el mundo de la ingeniería, tal es así, que el sector de la Protección Contra Incendios no podía ser menos y la emplea como herramienta de análisis, para predecir las consecuencias, de un incendio en un escenario concreto y existente, o para evaluar las causas, evolución, actuaciones o consecuencias de un incendio ocurrido en un escenario real. Esta forma de empleo permite definir como interactúan las variables de estado de un incendio, cuales son realmente importantes en la evolución de éste, etc.

También puede ser utilizada como herramienta de diseño para estudiar la efectividad de cierto grupo de medidas encaminadas a evitar un incendio o minimizar sus consecuencias en un escenario proyectado pero físicamente inexistente total o parcialmente. En este caso la simulación de incendios permite dar respuestas a las interrogantes de tipo “¿qué ocurriría si...? Relacionadas con la seguridad y los costos de las medidas de prevención, extinción y salvamento en escenarios proyectados, totalmente nuevos o existentes que se pretendan modificar.

El uso de los sistemas de simulación de incendios puede proporcionar una serie de ventajas como que puede emplearse repetidamente para analizar los factores deseados y los diseños o políticas propuestas o empleadas. Es mucho más económico y seguro que la experimentación física de ellos a escala real o reducida. En múltiples ocasiones es la única vía factible de análisis o diseño de estos sistemas. Son generalmente de más fácil aplicación que los métodos analíticos de solución, pueden prescindir de las asunciones restrictivas de éstos últimos, permiten controlar la exactitud de solución y obtener, prácticamente, cualquier variable de estado prevista.

Sin embargo construir y emplear con éxito modelos y simulaciones computacionales de incendios, como para cualquier tipo de modelos de simulación computacional (MSC), no es una ciencia exacta y se plantea que tiene muchos elementos de arte. Esto obliga al personal que la realiza a disponer de suficientes conocimientos científico-técnicos, habilidades y experiencia, adquiribles sólo a costa de tiempo y continuado esfuerzo. El desarrollo y uso de simulaciones de incendios sin los conocimientos y experiencia debidos y la toma de decisiones basadas en ellos puede resultar catastrófico. Los resultados de una simulación de incendios

pueden ser difíciles de interpretar, sin olvidar que el desarrollo y empleo de las simulaciones de incendios pueden requerir considerables gastos de tiempo y resultar costosos.

Para evaluar las condiciones a las que se verán sometidos los distintos escenarios expuestos en este proyecto, en casos de incendios postulados, se va a hacer uso de una herramienta capaz de realizar modelos computacionales de fluidos dinámicos (*CFD*) específicos para simular incendios.

El programa de simulación escogido es FDS, “Fire Dynamics Simulator”, capaz de modelizar incendios en entornos industriales y su herramienta para visualizar los cálculos numéricos, “Smokeview”. Ambos desarrollados por el "Building and Fire Research Laboratory" (BFRL) y el "National Institute of Standards and Technology" (NIST) de la Technology Administration. U.S. Department of Commerce.

FDS es actualmente uno de los modelos computacionales de fluidos dinámicos mas avanzados para simulación de incendios, además de ser un software de uso libre. Kevin McGrattan y Glenn Forney, los autores del programa, reconocen que este modelo está dando todavía sus primeros pasos, sin embargo existen variedad de estudios<sup>1</sup> que han validado las predicciones de FDS en el desarrollo de incendios y su propagación. Esto aumenta el nivel de confianza de su uso para este proyecto.

---

<sup>1</sup> Mas información sobre su validación en las siguientes referencias: 9. McGrattan 2004, 12. NUREG 1805 (FDT's) y 13. NUREG 1824.

---

## **1.1. OBJETIVOS Y MOTIVACIONES**

Como se ha dicho, en este proyecto se utiliza un modelo computacional para simular el desarrollo de posibles incendios. El objetivo fundamental es profundizar y estudiar el comportamiento de este tipo de modelos de manera que se pueda evaluar con el menor grado de incertidumbre la evolución y el impacto de un determinado incendio sobre diferentes escenarios y componentes de una central eléctrica con el fin de optimizar el diseño y conseguir evitarlo o en caso contrario detectarlo y extinguirlo rápidamente para limitar los daños, y proporcionar a las estructuras, sistemas y componentes un adecuado nivel de protección, de forma que un fuego que no ha sido extinguido no suponga un riesgo para la seguridad.

Los objetivos, por tanto, para este proyecto son:

- a) Mejorar la metodología de análisis y preparación de datos básicos de simulación, así como de optimizar el uso de los modelos de simulación.
- b) Estudiar la sensibilidad del código a distintos parámetros de entrada
- c) Identificar los recintos y componentes de mayor riesgo de incendio o los que según la experiencia se han visto afectados por un incendio cercano. Como el edificio eléctrico, transformadores, bandejas de cables, etc.
- d) Evaluar los materiales susceptibles de arder en estos recintos de estudio y obtener sus propiedades térmicas.
- e) Llevar a cabo la simulación para examinar el crecimiento del fuego, la propagación de las llamas y analizar si las temperaturas alcanzadas u otros parámetros pueden afectar a componentes o recintos cercanos.

### 1.2. LIMITACIONES Y APROXIMACIONES

Las simulaciones llevadas a cabo tienen una serie de limitaciones en su modelado. Para ajustar la realidad de la central de generación eléctrica al sistema de estudio se han tenido que realizar ciertas simplificaciones.

- Debido a que en FDS los objetos se definen según sus coordenadas en los tres ejes del espacio (X, Y y Z), la configuración física del edificio y sus componentes no pueden ser circulares o inclinados respecto a estos ejes. Por lo tanto la definición geométrica de todos los elementos está constituida por prismas rectangulares o composiciones de ellos.
- El tamaño de celda limita la definición geométrica de los componentes más pequeños. Se podía haber realizado un mallado más fino para aproximar mejor a la forma real pero supondría un gasto computacional excesivo sin mejorar los resultados apreciablemente.
- El combustible encontrado en los escenarios estudiados es aceite de refrigeración, pero hay una gran variabilidad en la composición de estos aceites. Dado que pequeñas variaciones en su composición provocan diferencias en los coeficientes estequiométricos de la reacción de combustión, éstos han sido asimilados al de un hidrocarburo estándar de aceite de refrigeración, teniendo en cuenta su composición general.

## 2. ANTECEDENTES

Hasta hace relativamente poco, los cálculos de protección contra incendio se hacían manualmente, mediante el uso de correlaciones y otras herramientas matemáticas<sup>2</sup>. Hoy en día, ha aparecido otra forma de diseñar la protección basada en el uso de programas informáticos para simular incendios.

Este nuevo enfoque nos permite conocer de una forma aproximada como evoluciona un incendio, las temperaturas que se alcanzan, la cantidad de humo y una gran cantidad de parámetros. Esta información nos permite tomar decisiones de diseño, como el tipo de material a utilizar, caudales de ventilación, etc.

Se define un modelo de fuego como una representación física o matemática de un incendio o de cualquier otro proceso relacionado con el fuego. Hay que señalar que los modelos físicos y los modelos matemáticos son complementarios.

Los modelos físicos intentan reproducir el fenómeno del fuego en una situación física simplificada. Por ejemplo, los modelos a escala son una forma muy extendida de modelado, ya que los experimentos en su magnitud real son caros, difíciles y, a veces, imposibles de llevar a la práctica. La información a menudo puede obtenerse mediante el estudio de los fenómenos del fuego a una escala física reducida.

Los modelos de fuego matemáticos incluyen una o más ecuaciones empíricas que pueden resolverse de forma analítica, o un conjunto de ecuaciones diferenciales y algebraicas complejas que deben resolverse de forma numérica en un ordenador. Los modelos matemáticos pueden utilizarse para predecir el comportamiento de los sistemas físicos reales.

Estos experimentos deben venir verificados por comparación con experimentos de fuego real.

Al programa informático que se emplea para obtener la solución numérica de un conjunto completo de ecuaciones diferenciales y algebraicas se le llama modelo informático de fuego.

---

<sup>2</sup> Ejemplos detallados se encuentran en la referencia 12. *NUREG - 1805 "Fire Dynamics Tools (FDT's)"*

---

Suele considerarse que el modelado del fuego es la predicción de las características del mismo mediante el uso de un método matemático, que se expresa en forma de programa informático.

Los modelos informáticos de fuego prestan su ayuda en una amplia gama de usos dentro de la investigación y el desarrollo de la ingeniería de protección contra incendios, tales como:

- El diseño resistente al fuego de una estructura
- Los análisis de riesgo de incendio
- La propagación del incendio
- El diseño de sistemas de control del humo
- La respuesta estructural de los elementos de una construcción
- El comportamiento humano y las salidas en caso de incendio
- La actuación de los dispositivos térmicos (rociadores, detectores, ventilaciones de techo, etc.)

Actualmente ya muchas normas de PCI (incluida la referencia 11. *NFPA 805 Performance-Based Standard for Fire Protection for Light Water Reactor Electric Generating- Plants*) permiten el uso de modelos informáticos de fuego como parte de los diseños de seguridad contra incendios.

La ingeniería de seguridad contra incendios se define como una aproximación desde el punto de vista de la ingeniería, al diseño de protección contra incendios. Está basada en:

1. El acuerdo sobre unos objetivos de seguridad contra incendios.
2. La evaluación determinista o probabilista del inicio, el crecimiento y el desarrollo del incendio.
3. Las propiedades físicas y químicas del fuego y de los efluentes del fuego.
4. La evaluación cuantitativa de la eficacia de las alternativas de diseño frente a los objetivos de pérdidas y los objetivos de funcionamiento.



## 2.1. MSCI- MODELOS DE SIMULACIÓN COMPUTACIONAL DE INCENDIOS

Los modelos matemáticos de fuego pueden agruparse en dos categorías: modelos de fuego probabilistas o estocásticos, y modelos de fuego deterministas.

- **Los modelos de fuego probabilistas** conllevan la evaluación de la probabilidad del riesgo de incendio basándose en las probabilidades de todos los parámetros que influyen en el incendio, como el comportamiento humano, la formación de aberturas y la distribución de carga de combustible en el compartimento de origen del fuego. Los resultados de los modelos se ofrecen en términos de probabilidad estadística de que se produzcan los incendios y de sus resultados, a partir de la naturaleza aleatoria del fuego y de la probabilidad de que se produzca. Se da poca o ninguna información sobre la producción y la distribución de los productos de combustión. (<sup>3</sup>Fire PRA – Fire Probabilistic Risk Assessment).

- **Los modelos de fuego deterministas** se basan en la relación física, química y termodinámica, y en la correlación empírica para calcular el impacto del incendio. Los modelos de fuego deterministas pueden ser muy simples y necesitar un tiempo de cálculo pequeño, o ser muy complejos y necesitar horas o días de computación. El término que generalmente se utiliza para designar a los Modelos Matemáticos deterministas de simulación computacional de incendios es el de Modelos de Simulación Computacional de Incendios (MSCI).

---

<sup>3</sup> NUREG/CR-6850: *Fire PRA Methodology for Nuclear Power Facilities*

---

## **2.2. CLASIFICACIÓN DE LOS MSCI**

Los MSCI utilizados para simular el incendio dentro de recintos cerrados pueden clasificarse, en líneas generales, en Modelos de Zona y Modelos de Campo.

Existen otros modelos con unos objetivos específicos, como son los modelos de evacuación (salida) de edificios, los modelos de dispositivos de actuación térmica (rociadores y sistemas de detección), los modelos de resistencia estructural al fuego, los modelos de diseño hidráulico de rociadores contra incendios, los modelos de movimiento o migración de humos y los modelos de interacción fuego-rociador.

En los últimos años se ha desarrollado un buen número de modelos informáticos de fuego, lo que demuestra el interés de los investigadores en este campo.

### **2.2.1. Modelos de zona**

Un modelo de zona es, en esencia, un modelo unidimensional que resuelve la ecuación de conservación básica para volúmenes distintos en función del tiempo. Este tipo de modelo se emplea para predecir el crecimiento del incendio y la propagación del humo en estructuras sencillas o de múltiples recintos. El modelo calcula la temperatura y la concentración de especies de gases (oxígeno, dióxido de carbono, etc.) en los espacios modelados, en función del tiempo.

El modelo de zona suele dividir cada habitación en dos espacios o zonas; una zona superior caliente, que contiene los gases producidos por el fuego, y una zona inferior fría, donde tiene su origen el aire para la combustión. Los tamaños de las zonas cambian durante el transcurso del incendio. La zona superior puede ampliarse y ocupar prácticamente el total del volumen de la sala.

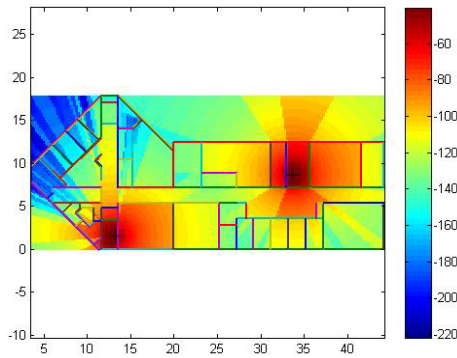
La principal ventaja de un modelo de zona es su relativa simplicidad, dejando más recursos disponibles en el ordenador para ampliar el alcance del modelo. De forma que los casos pueden calcularse de forma más rápida y barata en un ordenador personal.

Un modelo de zona requiere la entrada (input) de la geometría básica del espacio o espacios que se van a modelar, incluidas las dimensiones físicas, las propiedades

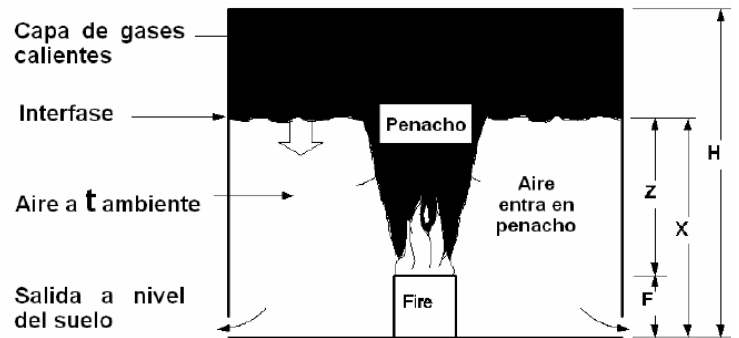
térmicas de los materiales limítrofes, los tamaños y la localización de las aberturas de ventilación, la ventilación mecánica, y la posición y los índices de crecimiento del incendio especificado.

La salida (output) incluye la temperatura de la capa de humo superior e inferior, la situación del punto de contacto entre zonas (altura de la capa de humo), las concentraciones de oxígeno y monóxido de carbono, el flujo de humo que entra y sale de las aberturas, y el flujo de calor de la capa de gas caliente hacia un blanco (target) del compartimento, en función del tiempo.

Ejemplos de modelos de zona son CFAST, COMPBRN-III, MAGIC y FLAMME-S.



**Figura 2.2-1:** Modelo de Zona, CFAST



**Figura 2.2-2:** Representación de las dos zonas del incendio según los Modelos de Zona

### **2.2.2. Modelos de campo**

Los modelos de campo evitan las simplificaciones inherentes a los modelos de zona y, por tanto, sus resultados son más refinados en comparación con los de los modelos de fuego de zona.

Algunos cálculos de modelos de campo pueden realizarse en PC rápidos; sin embargo, los problemas más complejos se calculan mejor en estaciones de trabajo potentes y en ordenadores avanzados.

Dichos modelos solucionan de forma numérica las ecuaciones de conservación de la masa, de la energía y del movimiento lineal, así como las ecuaciones de difusión y especies relacionadas con el fuego.

La temperatura, la velocidad y la concentración de gas se calculan con campos de dos o tres dimensiones, usando para ello un método de diferencias finitas, de elementos finitos o de elementos de contorno.

Un compartimento o espacio (dominio) se discretiza en celdas computacionales. Cuanto mayor sea el número de celdas, más refinada será la solución. El modelo determina la temperatura, la presión, la velocidad y la concentración de especies dentro de cada celda por cada incremento de tiempo.



*Figura 2.2-3: Modelos de Campo, FDS*

La ventaja de los modelos de campo sobre los de zona es que pueden proporcionar información detallada sobre los movimientos de los fluidos. El empleo de los modelos de campo en el estudio de los fenómenos de incendio ha crecido de manera espectacular durante los últimos años. El desarrollo actual de aplicaciones informáticas de dinámica de fluidos “Computational Fluid Dynamics” (CFD), cada vez más sofisticadas y a veces de mayor sencillez de manejo, ha dado lugar a la existencia de una gran cantidad de programas orientados a múltiples aplicaciones en el campo de la protección contra incendios.

La simulación mediante Modelos de Campo se puede efectuar con la ayuda de dos tipos de herramientas informáticas. Por una parte, programas informáticos de propósito general, tales como FLUENT o CFX, que tradicionalmente han venido utilizándose en aplicaciones industriales de diseño tales como aeronáutica, automoción, biomedicina, etc. Estos modelos no son exclusivamente Modelos de Simulación Computacional de Incendios (MSCI), sino que son Modelos de mecánica de fluidos de propósito general, que se están intentando aplicar en la protección contra incendios, aún cuando su diseño no está concebido específicamente para este fin.

Por otra parte, los principales organismos internacionales dedicados a la investigación de la ciencia y tecnología del incendio han desarrollado Modelos de Campo específicos, tales como FDS, SOFIE o JASMINE, creados para la valoración y análisis del riesgo de Incendio.

Algunos de los principales problemas de los Modelos de Campo aplicados al incendio son los siguientes:

- El gran número de posibles escenarios a considerar
- La inherente complejidad del problema ya que incluye fenómenos de turbulencia, de transporte de masa, de transporte de energía, etc.
- La imposibilidad de simular, de manera directa, el régimen caótico imperante y el comportamiento turbulento de las manifestaciones del incendio.
- El tratamiento de manera aproximada de los fenómenos de turbulencia, particularmente los grandes remolinos asociados a los penachos de gran tamaño, y el intercambio térmico por radiación entre partículas producidas durante la combustión, gases y superficies sólidas.

La mayor parte de las aplicaciones de CFD emplean modelos empíricos de turbulencia (*DNS*) o modelos de grandes remolinos (*LES*), aunque estos últimos son los que se están desarrollando más ampliamente en detrimento de los primeros.

### 2.3. VALIDACIÓN DE LOS MSCI

Los MSCI son los modelos más recientes y complejos. Su uso implica un conocimiento de la ciencia del incendio y de los principios de la ingeniería de la seguridad contra incendios.

Es poco probable, dada la escasez de recursos destinados a este campo y el elevado coste económico de los ensayos, encontrarse con Modelos en los que se ha llevado a cabo un proceso de validación, verificación y acreditación, metódico y completo. Los ingenieros de protección contra incendios que utilizan los Modelos Computacionales como elemento principal de diseño en sus proyectos, se encuentran en una situación, obviamente, comprometida. El análisis, por parte de los diseñadores, de los límites de aplicación de los modelos, apoyado en resultados experimentales de casos similares a los del problema evaluado, da lugar a una mayor fiabilidad de los resultado de los estudios.

Cuando el diseño de la seguridad contra incendios en una edificación se apoya, de un modo decisivo, en la Simulación Computacional de Incendios, las autoridades reguladoras de las que depende su aprobación necesitan sólidos elementos de juicio para valorar la incertidumbre derivada de posibles errores y asunciones en los datos de partida o de la robustez de las bases científicas y técnicas de los Modelos.

Quizás el atributo más importante que se busca al emplear un MSCI es su capacidad para predecir, de manera rigurosa y realista, el comportamiento del incendio dentro de unos límites preestablecidos. Sin embargo, la capacidad predictiva del modelo depende de los conocimientos científicos puestos en práctica durante el modelado del fenómeno y de la adecuada aplicación de esos conocimientos a un esquema de cálculo. Además, es frecuente, que existan ciertas carencias acerca de los fundamentos de la ciencia del incendio y sus procesos asociados.

El proceso de evaluación de un MSCI es crítico para establecer sus aplicaciones y limitaciones. La validez de un MSCI para una determinada aplicación o escenario de incendio no implica su adecuación a otros de diferentes características<sup>4</sup>.

---

<sup>4</sup> En EE.UU. la validación, verificación y acreditación – VV&A: *Verification, Validation and Accreditation* – es obligada en cualquier Modelo propuesto.

---

Entre los aspectos que pueden afectar a la precisión de los modelos de incendios, se encuentran los errores cometidos en la fase de diseño y la asunción de valores de partida no adecuados. Los usuarios de los modelos se encuentran provistos, en ocasiones, de una descripción básica e incompleta del escenario a simular y, a pesar de ello, son responsables de asignar valores apropiados a los datos de entrada de los diseños, incluyendo detalles adicionales correspondientes a la geometría, propiedades de los materiales y descripción del incendio.

Una evaluación rigurosa de los modelos de incendios, en la que se analicen aspectos tan importantes como la robustez de las bases científicas y técnicas de los modelos, la adecuación a diferentes usos planteados y el nivel de confianza que se puede conceder a los resultados previstos por los Modelos, ayuda a consolidar el empleo de los MSCI como una herramienta eficaz y fiable, así como a prevenir una utilización manipulada y parcial de los modelos.

Con la intención de abordar los asuntos anteriormente planteados, varias organizaciones e instituciones, principalmente ubicadas en los Estados Unidos, han desarrollado diferentes guías y herramientas metodológicas en las que se proponen pautas para el diseño y análisis de los modelos de incendios. Una referencia internacional son las guías desarrolladas por la American Society for Testing and Materials – ASTM Internacional (<http://www.astm.org>) es una organización sin ánimo de lucro que proporciona un espacio de debate para el desarrollo y publicación de estándares de cumplimiento voluntario para materiales, productos, sistemas y servicios.

El Subcomité E05.30 de la ASTM de Fire Modeling, actualmente incorporado al Subcomité E05.33 de la Ingeniería de la Seguridad contra Incendios (Fire Safety Engineering), desarrolló las ASTM GUIDES – Guías sobre MSCI:

- ASTM E 1355: Proporciona una metodología para evaluar la capacidad predictiva de un Modelo Determinista de Incendio en una aplicación específica.
- ASTM E 1472: Establece la información que debería contener la documentación de un programa informático preparado para realizar cálculos en los Modelos de Simulación Computacional de Incendios empleados en la ciencia, ingeniería y otras áreas de la seguridad contra incendios.



- ASTM E 603: Guía para experimentos de fuego en habitaciones. Guía de expresiones de incertidumbre en la medida.
- ASTM e 1591: Describe la información requerida para la evaluación sistemática de Modelos de Incendio, que pueda emplearse en el análisis del riesgo de incendio, y medidas para identificar las limitaciones, tanto generales como específicas, de los modelos de incendio para aplicaciones concretas.

La edición actual del ASTM 1355 se debe a la revisión que realizó el NIST (National Institute of Standard and Technology) y fue aprobada en 1997. Las fases que se realizan en el modelo de evaluación propuesto en la ASTM E 1355 son las siguientes:

1. Definir el modelo y los escenarios con los que se va a realizar la evaluación.

Consiste en la evaluación de las descripciones de los posibles escenarios de incendio. Se necesita información suficientemente amplia para determinar la conveniencia o no del escenario planteado, de la aplicación prevista, etc. La documentación asociada a la evaluación se prepara según la ASTM E 1472, que define todos los elementos necesarios para una evaluación apropiada.

2. Evaluar la adecuación de las bases teóricas y las asunciones empleadas en el modelo.

Consiste en la revisión detallada de la base teórica del modelo y una evaluación de la corrección de las asunciones que se plantean y de las aproximaciones utilizadas.

3. Verificar la robustez matemática y numérica del modelo.

Un experto externo debe informar sobre la validez del modelo, determinando la robustez matemática y numérica del mismo. La verificación se realiza comparando los resultados obtenidos por el modelo con las soluciones analíticas de las que se disponga para los problemas simples, comprobando el programa (código fuente) e investigando la exactitud y convergencia de las soluciones numéricas de las ecuaciones del modelo

4. Cuantificar la incertidumbre y exactitud de los resultados del modelo

Se basa en la comparación de las soluciones proporcionadas por el modelo y los datos experimentales de los que se dispone. Es un método indirecto de validación y de verificación

del modelo para un escenario seleccionado. Se asume que las ecuaciones que sustentan el modelo están planteadas y se resuelven correctamente, y que los términos “evaluación” y “validación” se pueden emplear indistintamente.

Los datos experimentales para la evaluación y validación del modelo se pueden obtener a partir de ensayos estándar de laboratorio, de ensayos *ad hoc* desarrollados como parte del proceso de evaluación del modelo, de referencias bibliográficas y/o de otros datos de los que se disponga.

Se presentan, por lo general, varios tipos de incertidumbre cuando se comparan las predicciones del Modelo con los datos experimentales. Uno de los tipos de incertidumbre es el debido a los posibles errores y asunciones efectuados durante la determinación de los datos de partida. Es necesario realizar un cuidadoso análisis e identificación de los parámetros críticos de entrada de forma individual y sus posibles interacciones. Para ajustar el modelo computacional sin perder información imprescindible se pueden utilizar técnicas matemáticas especiales<sup>5</sup>.

La mayor incertidumbre se presenta en las asunciones realizadas durante el diseño y obtención del modelo, que se pueden cuantificar durante el proceso de validación.

Cualquier ensayo a escala real está sujeto también a ciertas incertidumbres experimentales, a veces ajenas o distantes a las que ofrece un incendio real. Por ello, en cualquier caso, entre el modelo y el ensayo experimental a escala real, se producen incertidumbres que se deben, por lo general, a errores de medida. Para evitar estas incertidumbres, existen procedimientos para determinar la precisión de los métodos de ensayos estándares.

Un ensayo a escala real no se repite aunque sus resultados cuenten con mayor o menor incertidumbre, debido al coste que implica, aunque existen procedimientos para su análisis y valoración. Algunos de ellos corresponden al empleo de técnicas especiales o a la discusión en foros de debate científico.

---

<sup>5</sup> Ver “*Issues in Evaluation of Complex Fire Models*” – Pencoek, R. D.; Forney, C. L.; Kostreva, M. M. Fire Safety Journal Vol. 30 pág 103-136-1998.

---

Se han llevado a cabo numerosos estudios de validación, verificación y acreditación de los MSCI, muchos de ellos referidos a recintos relativamente pequeños, en torno a 10 m<sup>2</sup>, con fuentes de incendios perfectamente definidas. En general, el mejor acuerdo que se puede esperar es del orden de un  $\pm 20\%$ <sup>6</sup> en términos de temperatura y profundidad de la capa de humo.



*Fig 2.3-1. – Ensayo a escala real en el interior de un edificio (NIST)*

---

<sup>6</sup> “*Fire Protection Handbook*”. – 19ª Edición. 2002

## **2.4. SOFTWARE UTILIZADO**

Tras plantearse la utilización de otros programas, las herramientas prioritarias seleccionadas para la realización del proyecto han sido el programa de modelado "Fire Dynamics Simulator" (FDS) y el programa de visualización "Smokeview", desarrollados por el "Building and Fire Research Laboratory" (BFRL) y el "National Institute of Standards and Technology" (NIST) de la Technology Administration. U.S. Department of Commerce.

Esta selección se ha realizado basándose en los siguientes criterios:

- FDS es un modelo específico para utilización en escenarios de incendios, bien capacitado para modelar recintos conteniendo cables y otros componentes típicos en centrales eléctricas.
- Se trata de un modelo auspiciado y verificado por organismos reguladores americanos, por lo que se considera que es extrapolable a su uso en aplicaciones de centrales eléctricas españolas.
- Es un modelo de campo que tiene una alta capacidad de aplicación en escenarios complejos. Su manejo es relativamente sencillo. Como contrapartida necesita mayor potencia y tiempo de ordenador. Su utilización es gratuita y fácilmente accesible.

### **2.4.1. Características y capacidades del programa seleccionado**

La versión que actualmente se está utilizando para el desarrollo de los modelos es la versión 4.0.6 de FDS y versión 4.0.7 Beta de Smokeview. Es posible descargarla de la web del NIST - [www.bfrl.nist.gov/](http://www.bfrl.nist.gov/)

Las diferencias principales de FDS en las diferentes versiones es la mejora en la velocidad de cálculo, posibilidad de introducir detectores de humo en locales, mejora en el manejo de sustancias inflamables, capacidad de aumentar las propiedades de los elementos combustibles, etc. Las nuevas versiones de Smokeview permiten una mejor accesibilidad de los datos y un mejor manejo gráfico de los modelos.

El modelo resuelve numéricamente una forma de ecuaciones de Navier-Stokes apropiadas para baja velocidad, flujo térmico, con un especial énfasis en el humo y en el transporte de calor por el fuego. Las derivadas parciales de las ecuaciones para la conservación de la masa, del momento y la energía se aproximan por diferencias finitas, y la solución se actualiza en una malla rectilínea de 3 dimensiones.

La radiación térmica se computa usando volúmenes finitos en la misma malla que en la solución de flujo. Las descargas de rociadores y el movimiento del humo se modelizan mediante partículas Lagrangianas.

FDS es un modelo de campo CFD ("Computational Fluid Dynamics") capaz de calcular la temperatura, la densidad, la presión, la velocidad, flujo de calor, tasa de pérdida de masa y la composición química en cada celda de la malla en cada paso de tiempo discreto.

El gobierno de las ecuaciones e hipótesis son las siguientes<sup>7</sup>:

- **Modelo hidrodinámico:** FDS resuelve numéricamente una forma de ecuaciones de Navier-Stokes. El núcleo del algoritmo es un esquema "corrector-predictor" de segundo orden precisado en el espacio y en el tiempo. Las turbulencias son tratadas por la forma Smagorinsky de las "Large Eddy Simulation" (LES). Se puede hacer una simulación numérica directa (DNS) de las turbulencias si la malla es lo suficientemente fina.
- **Modelo de combustión:** FDS usa un modelo de combustión de mezcla fraccionada. La fracción de mezcla es conservada como una cantidad escalar que es definida como una fracción de gas dada en un punto del campo de flujo que es originado como combustible. El modelo asume que la combustión es una mezcla controlada, y que la reacción del combustible y el oxígeno es infinitamente rápida.

---

<sup>7</sup> *Fire Dynamics Simulator (Version 4) - Technical Reference Guide NIST Special Publication 1018*

- **Radiación:** La transmisión de calor por radiación está incluida en el modelo por medio de la solución de la ecuación de transporte de radiación para gases.
- **Geometría:** FDS utiliza para los modelos, tanto en obstáculos como en mallas, elementos rectangulares. Resuelve las ecuaciones de gobierno en elementos finitos rectangulares. El usuario define la geometría mediante entidades, también rectangulares que se rellenan con esos elementos finitos.
- **Condiciones de contorno:** A todas las superficies se les asocia unas condiciones de contorno, así como información de quemado del material. Habitualmente las propiedades del material son almacenadas en una base de datos, a las cuales se puede acceder mediante el nombre del material en el código de FDS. El calor y la transferencia de masa se realizan mediante correlaciones empíricas.
- **Detectores y rociadores:** La activación de los detectores de calor y los rociadores se hace a partir de una correlación simplificada basada en la inercia térmica. Los detectores de humo usan un retraso en el transporte del humo. Los rociadores son modelados mediante partículas Lagrangianas.

Todos los parámetros requeridos por FDS para describir un escenario particular son introducidos en el programa mediante archivos de texto. Estos archivos contienen información sobre la malla, condiciones ambientales, geometría del recinto, propiedades de materiales, cinética de la combustión y los resultados que se desean obtener.

FDS necesita un número determinado de propiedades de materiales como datos de entrada, ya sean susceptibles de arder o formen parte del escenario. Para superficies sólidas, FDS necesita la densidad, la conductividad térmica, calor específico y emisividad. Hay que tener en cuenta que FDS no distingue entre partes estructurales y otros elementos que componen el escenario.

Para cada combustible, FDS necesita conocer si es sólido, líquido o gas, calor de combustión, calor de vaporización (líquido y gas), los coeficientes estequiométricos de la reacción ideal, las cenizas y la fracción de energía emitida en forma de radiación.

Algunos de los resultados más comunes suministrados por FDS para la fase gaseosa son los siguientes:

- ✓ Temperatura del gas
- ✓ Velocidad del gas
- ✓ Concentración de especies de gas (vapor de agua, CO<sub>2</sub>, CO, N<sub>2</sub>)
- ✓ Concentración de humo y estimación de la visibilidad
- ✓ Presión
- ✓ Transferencia de calor por unidad de volumen
- ✓ Fracción de mezcla (o ratio aire/combustible)
- ✓ Densidad del gas
- ✓ Masa de descarga de agua por unidad de volumen

FDS predice parámetros adicionales, en superficies sólidas, asociados al balance energético entre el gas y la fase sólida, incluyendo:

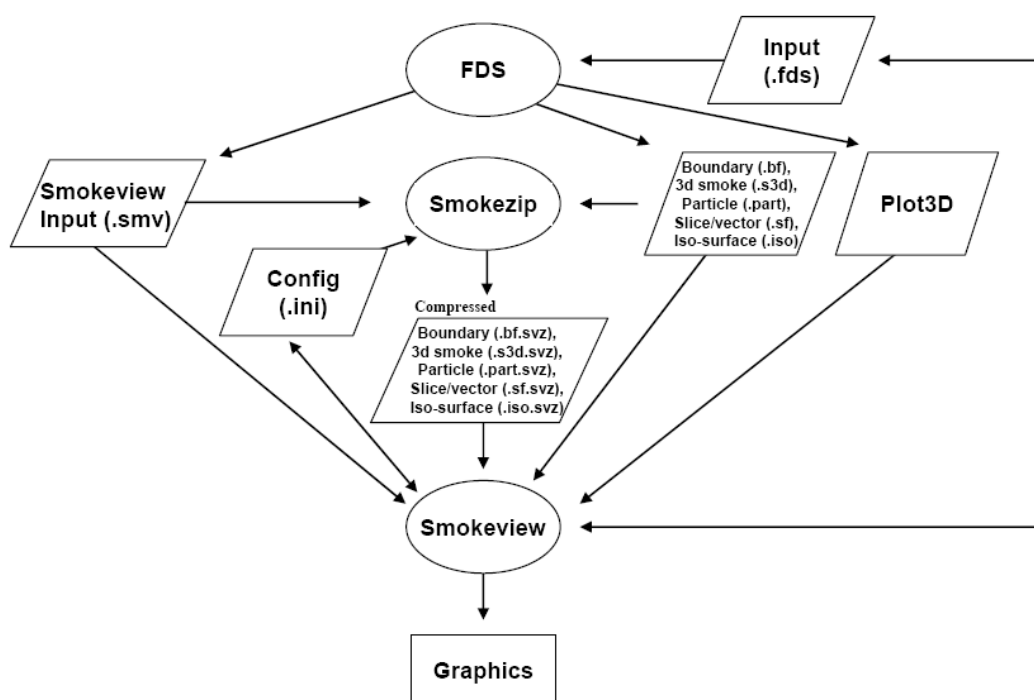
- ✓ Temperatura interior y de superficie
- ✓ Flujo de calor, ya sea por radiación, conducción o convección
- ✓ Tasa de gasto másico de combustible
- ✓ Masa de descarga de agua por unidad de área

Las magnitudes globales almacenadas por el programa son:

- ✓ Transferencia de calor total (HRR)
- ✓ Tiempos de activación de rociadores y detectores
- ✓ Flujos de masa y energía por aberturas y sólidos

A su vez se pueden obtener más campos y datos de superficies mediante el programa Smokeview, una herramienta postproceso especialmente diseñada para analizar y representar los resultados obtenidos por FDS.

FDS y Smokeview son usados conjuntamente para la visualización de los fenómenos de incendios.



**Figura 2.4-1:** Diagrama con archivos usados y generados por FDS y Smokeview



## 2.5. BASES TEÓRICAS DE FDS

Este apartado describe a grandes rasgos las hipótesis y ecuaciones en las que se basa FDS para familiarizar al lector con los conceptos y la teoría fundamental que subyacen bajo su modelo<sup>8</sup>.

### 2.5.1. Modelo Hidrodinámico

Los algoritmos de FDS resuelven numéricamente una forma de ecuaciones de Navier-Stokes para flujos térmicos de baja velocidad, haciendo especial hincapié en el transporte del humo y el calor provocados por el fuego. El algoritmo principal es un esquema de ecuaciones diferenciales de segundo orden, dependientes del tiempo y del espacio. Capaz de resolver las ecuaciones de conservación de masa, momento, energía y transporte de especies en pasos discretos de tiempo y para cada celda del mallado.

Las turbulencias se tratan con la técnica de simulación de grandes escalas con el modelo de Smagorinsky (*Large Eddy Simulation, LES*), en la que las turbulencias se calculan directamente y los procesos de disipación a través del mallado se modelan posteriormente. También se puede realizar una simulación numérica directa (*Direct Numerical Simulation, DNS*), en el que las formas de disipación se calculan directamente, cuando el mallado es suficientemente fino (referencia 9. *McGrattan 2004*). FDS no tiene integrada la capacidad de resolver las ecuaciones por el método *RANS* (*Reynolds Averaged Navier Stokes*).

En el caso de estudio, se va utilizar la técnica *LES* para modelizar procesos disipativos (viscosidad, conductividad térmica y difusividad de especies) ya que tienen lugar a escalas de magnitud menores que las que se resuelven explícitamente en el mallado numérico.

---

<sup>8</sup> Se puede encontrar información mas detallada en las siguientes referencias: 3. *Carlsson (2003)*; 5. *Cox (1995)*; 7. *Floyd et al. (2001)* y 9. *McGrattan (2004)*

---

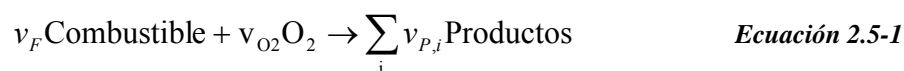
### 2.5.2. Modelo de Combustión

Hay dos tipos de modelos de combustión que pueden usarse en FDS. La decisión de cuál elegir depende del grado de detalle que se desee en la simulación. Si el modelo estipulado es el de Smagorinsky (*Large Eddy Simulation, LES*), se utiliza un modelo de combustión de mezcla fraccionada.

El modelo de combustión basado en la fracción de mezcla aproxima el proceso de combustión, tanto en el espacio como en el tiempo, de forma que el fuego puede simularse mas eficientemente, (7. Floyd et al. 2001). Se asume que los fenómenos de transporte, que se producen a gran escala por convección y radiación, se pueden simular directamente. Si el proceso ocurre a escalas de tiempo y espacio pequeñas, se debería representar el modelo de forma más realista, (9. McGrattan 2004).

Esta simplificación es esencial porque las reacciones químicas que controlan el desprendimiento de energía en la combustión, son muy complejas. De forma que desde un punto de vista computacional resulta muy costoso incluirlas en el cálculo, incluso cuando es en su forma reducida, en simulaciones de modelos computacionales de fluidos dinámicos (*CFD*), (3. Carlsson 2003).

En un modelo basado en la fracción de mezcla, la combustión se calcula a partir de las proporciones de mezcla entre combustible y oxidante. Las reacciones químicas entre el combustible y el oxígeno se toman siguiendo paso a paso la reacción estequiométrica.



En esta ecuación,  $v$  e  $i$  son los coeficientes estequiométricos para el proceso de combustión completa. El reactante, en este caso el combustible “F”, junto con el comburente, en este caso el oxígeno “O<sub>2</sub>” producen un número de productos “P”.

El modelo asume que la combustión está controlada por la mezcla y que todas las especies de interés se pueden representar mediante una única variable conocida como fracción de mezcla,  $Z(x, t)$ .

La fracción de mezcla es una magnitud que representa la proporción de un material, en una localización dada, que se ha generado en el chorro de combustible y que se define como:

$$Z = \frac{sY_F - (Y_{O_2} - Y_{O_2}^\infty)}{sY_F^I + Y_{O_2}^\infty}; \quad s = \frac{v_{O_2}M_{O_2}}{v_F M_F} \quad \text{Ecuación 2.5-2}$$

Donde  $Y_F^I$  es la fracción másica en el chorro de combustible,  $M_F$  es el peso molecular del combustible y  $M_{O_2}$  es el peso molecular de oxígeno. Por definición  $Z$  varía su valor entre 1, cuando la región solo contiene combustible, y 0 cuando la fracción másica de oxígeno se iguala con su valor en el entorno,  $Y_{O_2}^\infty$ .

Se considera que la reacción progresa infinitamente rápido, lo que significa que todas las mezclas de oxígeno y combustible reaccionan instantáneamente en cuanto se mezclan, como si ambos no pudieran coexistir juntos. Este comportamiento implica que tanto el combustible como el oxígeno, desaparecen en un determinado instante en la que sus fracciones másicas  $Y_i$  disminuyen hasta 0. Obteniéndose la fracción de mezcla de la llama  $Z_f$ :

$$Z_f = \frac{Y_{O_2}^\infty}{sY_F^I + Y_{O_2}^\infty} \quad \text{Ecuación 2.5-3}$$

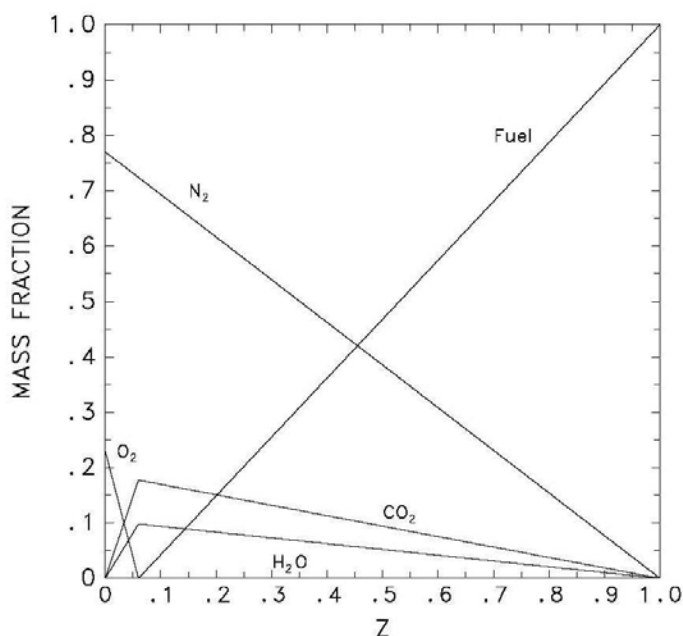
La fracción de mezcla de la llama  $Z_f$  define la llama estableciendo una superficie bidimensional, conocida como lámina de llama, en el espacio tridimensional (9. McGrattan 2004).

El supuesto de que el combustible y el oxidante no pueden coexistir también gobierna la relación de estado entre la fracción másica del oxígeno  $Y_{O_2}$  y la fracción de mezcla  $Z$ , como muestra la siguiente ecuación:

$$Y_{O_2}(Z) = \begin{cases} Y_{O_2}^{\infty} \left( 1 - \frac{Z}{Z_f} \right) & Z < Z_f \\ 0 & Z > Z_f \end{cases} \quad \text{Ecuación 2.5-4}$$

También pueden describirse las fracciones másicas del resto de especies de interés, mediante relaciones individuales de estado basadas en mezclas fraccionadas. Estas relaciones de estado se pueden determinar a partir del análisis de la reacción estequiométrica del combustible a considerar.

La *figura 2.5-1* ilustra las relaciones de estado de varias especies en el caso de tener como combustible el propano. Si nos fijamos, las líneas del combustible y del oxígeno intersecan donde la fracción másica es nula. Como se ha comentado anteriormente, este punto es donde se define la lámina de llama.



**Figura 2.5-1:** Relaciones de estado para el propano.  
McGrattan (2004)

### 2.5.2.1. Limitaciones del modelo de combustión de mezcla fraccionada

El modelo basado en la fracción de mezcla, descrito anteriormente, tiene una serie de limitaciones, tanto numéricas como físicas. Sus limitaciones numéricas están relacionadas con la resolución en el mallado.

Si se define un mallado demasiado grueso el fuego no se resolverá adecuadamente. Esto tendría repercusiones en la superficie de la llama, definida a partir de la fracción de mezcla  $Z = Z_f$ , de forma que se estimará una altura de llama demasiado baja. Consecuentemente, el HRR (desprendimiento de calor), también se subestimarán.

La forma de superar este problema hace necesario utilizar un valor de  $Z$  que defina la región de combustión, de forma que la altura de llama sea la adecuada. La expresión que se utiliza para calcular este valor de la fracción de mezcla,  $Z_{f,eff}$ , es:

$$\frac{Z_{f,eff}}{Z_f} = \min\left(1, C \frac{D^*}{\delta x}\right) \quad \text{Ecuación 2.5-5}$$

Donde  $C$  es una constante empírica, (que es independiente del escenario donde se simule),  $D^*$  es el diámetro característico del fuego, que viene dado por:

$$D^* = \left( \frac{\dot{Q}}{\rho_\infty c T_\infty \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}} \quad \text{Ecuación 2.5-6}$$

Y  $\delta x$  representa el tamaño nominal de las celdas del mallado.

Otro problema que surge con mallados demasiado gruesos es una cantidad desproporcionada de energía desprendida en la combustión, cerca de los bordes de la fuente del fuego. Para evitar que se desprenda más energía de la cuenta excesivamente cerca de la fuente del fuego cuando el mallado es grueso, se fuerza un límite para el desprendimiento de calor local por unidad de área, (HRRPUA), en la lámina de la llama.

Este límite se basa en un análisis en el que el fuego se aproxima a una forma cónica, con un área de su superficie  $A_{sur}$ . La altura de llama  $H_f$  viene dada por la siguiente expresión:

$$\frac{H_f}{D} = 3.7\dot{Q}^{*\frac{2}{3}} - 1.02 \quad \text{Ecuación 2.5-7}$$

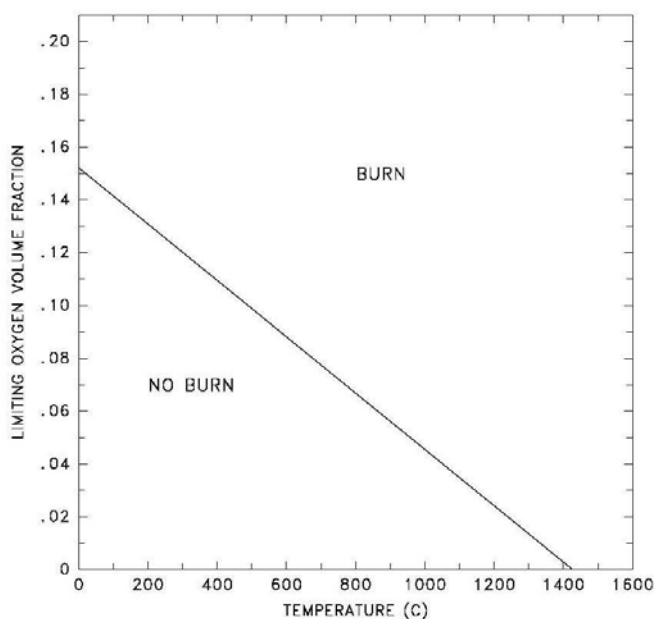
El área de la superficie de una llama real es mayor que la de un cono, así que este límite superior previene de un exceso de energía que se genere demasiado cerca del fuego, en caso de un mallado grueso. Pero este límite podría ser suficientemente alto como para desviar el cálculo, en caso de que el mallado se resuelva correctamente.

Cualquier energía que sea atenuada por este límite superior se distribuye por todo el volumen de la llama de forma automática, (9. McGrattan 2004).

Los límites físicos del modelo de combustión de mezcla fraccionada son: que se asume que el combustible y el oxígeno se queman instantáneamente en cuanto se mezclan. Esta suposición de reacción química rápida normalmente no plantea restricciones en los cálculos típicos, como en fuegos bien ventilados.

Sin embargo, si el fuego se encuentra en un compartimento deficientemente ventilado, o si se introduce un agente extintor como agua rociada o  $CO_2$ , el combustible puede mezclarse con el oxígeno sin que se produzca combustión alguna, (9. McGrattan 2004).

La forma de superar esta limitación física es implementar un modelo para la extinción de llamas en FDS. Este modelo relaciona la extinción de la llama con la concentración de oxígeno y la temperatura, como puede verse en la *figura 2.5-2*. Cuando el gas del ambiente alcanza la zona de “NO BURN”, las relaciones de estado dejan de ser válidas para valores de  $Z$  menores al de la reacción estequiométrica. Desde este momento parte del combustible puede mezclarse con otros productos de la combustión, (9. McGrattan 2004).



**Figura 2.5-2:** Fases Oxígeno-Temperatura, indicando dónde puede darse la combustión. McGrattan (2004)

Esto permite simular fuegos infra-ventilados o los escenarios de extinción de incendios con FDS. Distinguiéndolo de la que la mayoría de aplicaciones informáticas de dinámica de fluidos (CFD), que no son capaces de predecir el comportamiento del fuego de forma precisa bajo estas condiciones, (3. Carlsson 2003).

### 2.5.3. Modelo Pirolítico

FDS incluye un modelo simplificado del encendido y la propagación de llamas de superficie, en los que asigna una temperatura de ignición a la superficie del combustible. La tasa de quemado está gobernada por una constante establecida por el usuario, esta constante es, o bien la tasa de desprendimiento de calor por unidad de área HRRPUA; o el calor de vaporización (o gasificación)  $\Delta H_v$ .

Si se especifica el HRRPUA, la superficie se quemará como si fuera un mechero una vez que alcance su temperatura de ignición. Si es  $\Delta H_v$  la que se especifica, la tasa de quemado del combustible dependerá del calor neto del fuego que realmente la superficie que está ardiendo. Para combustibles termoplásticos, el cálculo de calor neto de realimentación dependerá de que la superficie del material sea térmicamente gruesa o delgada.

Si se considera un material térmicamente delgado, se aplica una ecuación de conducción de calor del material en una dimensión  $T(x, t)$ . En este caso en la dirección  $x$  hacia el sólido, (el punto  $x = 0$  representa la superficie). La ecuación sería:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right); -k \frac{\partial T}{\partial x}(0, t) = \dot{q}_{con}'' + \dot{q}_{rad}'' - \dot{m}'' \Delta H_v \quad \text{Ecuación 2.5-8}$$

Donde  $\rho$  es la densidad, que depende de la temperatura;  $c$  es el calor específico,  $k$  la conductividad de los materiales.  $\dot{q}_{con}''$  es el flujo de calor por convección en la superficie,  $\dot{q}_{rad}''$  el de radiación,  $\dot{m}''$  la tasa de pérdida de masa por unidad de área y  $\Delta H_v$  el calor de vaporización.

Se supone que la combustión tiene lugar en la superficie, de forma que el calor requerido para vaporizar el combustible se extrae del flujo de energía entrante. La tasa de quemado se estima utilizando la siguiente ley de tasa de Arrhenius de un único paso de primer orden:

$$\dot{m}'' = A \sigma \cdot e^{-\frac{E_A}{RT}} \quad \text{Ecuación 2.5-9}$$

El valor del factor pre-exponencial  $A$  y la energía de activación  $E_A$  se escogen para que la combustión se produzca muy cerca de una temperatura de ignición dada. Estos parámetros son probablemente los mas difíciles de determinar para un modelo de este tipo. Los valores encontrados en varias referencias no son coherentes entre sí y pueden variar en mas de un orden de magnitud, (3. Carlsson 2003).

Si  $A$  y  $E_A$  no son conocidos, que es el caso más habitual, el usuario puede especificar la velocidad de flujo de masa crítica y la temperatura de ignición. De forma que es el código el que escoge entre  $A$  y  $E_A$  para que el combustible arda con una velocidad de flujo de masa crítica en el momento en el que la superficie alcance la temperatura de ignición, (10. McGrattan and Forney 2004).

Si se considera un material térmicamente grueso, es decir, si se supone que su temperatura es uniforme a lo largo de su profundidad; entonces  $T(t)$  varía en función de



que haya pérdidas o ganancias por convección, radiación y combustión. El retraso térmico del material depende del producto de su densidad, calor específico y espesor  $\delta$ . La ecuación de transferencia de calor se describe como:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\dot{q}_{con}'' + \dot{q}_{rad}'' - \dot{m}'' \Delta H_v}{\rho \cdot c \cdot \delta} \quad \text{Ecuación 2.5-10}$$

Los flujos de calor por convección y radiación se suponen sobre la superficie superior y posterior del combustible delgado. Se supone que la superficie inferior está a temperatura ambiente, pero no se tiene en cuenta por defecto en FDS, a no ser que se especifique lo contrario, (9. McGrattan 2004). La tasa de quemado para un combustible térmicamente delgado se calcula también usando la ecuación 2.5-4.

La transferencia de calor y la combustión de un combustible líquido, como el encontrado en la central estudiada, es diferente a los de los combustibles termoplásticos.

La tasa a la que el combustible líquido se evapora cuando arde es función de la temperatura del líquido y la concentración de vapor del combustible sobre la superficie del derrame, (9. McGrattan 2004). Se alcanza el equilibrio cuando la presión parcial del vapor de combustible sobre la superficie iguala la presión de Clausius-Clapeyron:

$$p_{cc} = p_o \cdot e^{\left[ \frac{h_v M_f}{R} \left( \frac{1}{T_s} - \frac{1}{T_b} \right) \right]} \quad \text{Ecuación 2.5-11}$$

Donde  $h_v$  es el calor de vaporización,  $M_f$  la masa molecular,  $T_s$  la temperatura de la superficie y  $T_b$  la temperatura de ebullición del combustible. No se calcula la transferencia de calor por convección del líquido a través del derrame.



### **3. DESARROLLO DE METODOLOGÍA**

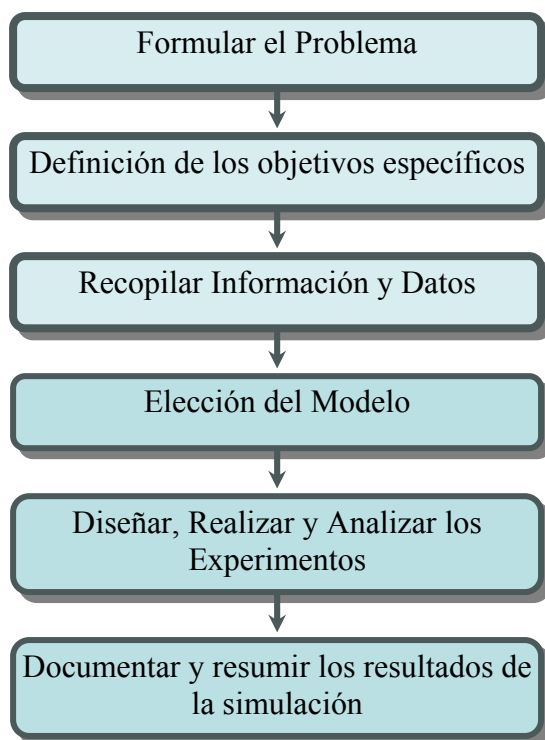
En este proyecto se pretende también designar un esquema metodológico que describa los pasos, tareas, fases y procesos que deben cumplirse para desarrollar un trabajo de simulación computacional con éxito.

La rigurosidad y minuciosidad al comienzo de un trabajo de simulación es de primordial importancia, disminuye la probabilidad de tener que realizar reconsideraciones en fases posteriores, y redundante en una disminución sensible en los costes económicos de todo el ciclo de simulación.

El estudio de las tareas que implica la dirección y gestión durante la realización de trabajos de simulación computacional de incendios, en base a la experiencia y opiniones de diferentes autoridades en la materia, además de las aportaciones basadas en experiencias propias en el campo de la simulación de incendios, muestra que el proceso completo de un trabajo de simulación de incendios sobre un determinado modelo es una labor con múltiples fases, etapas y acciones a considerar y ejecutar donde la omisión de alguna de ellas puede tener como consecuencia resultados erróneos, con grandes desviaciones con respecto a la realidad que se desea reproducir. Por ello a continuación se formulan algunos principios a modo de metodología para el desarrollo de trabajos de simulación computacional de incendios.

El uso de MCSI está permitido para examinar el impacto de los diferentes escenarios de fuego frente al criterio de desarrollo que se ha considerado. Han de ser verificados y validados y sólo son aceptados los modelos aprobados por la autoridad competente. Teniendo en cuenta sus limitaciones.

### **3.1. METODOLOGÍA GENERAL**



*Figura 3.1-1 - Metodología para el desarrollo de estudios de simulación*

#### **3.1.1. Formulación del problema del incendio**

En esta etapa se analizan los problemas y los objetivos que se desean alcanzar, esbozando las formas en que pueden obtenerse los resultados de las simulaciones. En los casos de aplicaciones específicas de ingeniería, se definen objetivos de prestaciones que se pueden describir como los requerimientos necesarios del incendio, edificio, u ocupantes para alcanzar un objetivo general de Seguridad contra Incendios, es decir, definen una serie de acciones necesarias para conseguir cierto objetivo.

Se realiza un primer análisis del conjunto de características de los escenarios y el entorno del incendio a reproducir, apoyado en la valoración de estudios precedentes de casos similares u otros que por algún comportamiento particular pudieran aportar información. Se define preliminarmente el tipo o tipos de modelos a emplear: continuos, de eventos discretos, mixtos, deterministas, probabilísticos, dinámicos, estáticos, etc.

### **3.1.2. Definición de los objetivos específicos en la Simulación**

Inicialmente, se determinan las variables de entrada a la simulación (características del escenario de incendio y su entorno), y los rangos estimados de estas variables. A continuación, se definen las variables de salida de la simulación (características de los sistemas de detección y/o extinción, valores límite de alteración de estructuras o equipo, niveles de afectación por humos o productos de la combustión, etc), precisando las formas de presentar las variables de salida (mediante gráficos, tablas, por valores límites, en informes impresos, etc.).

Se establecen las particularidades intrínsecas (variables y parámetros del escenario del incendio: tipos de materiales combustibles y sus características, cargas de fuego, ubicación espacial de los materiales, equipos y estructuras, métodos y medios de extinción pasivos y activos, etc.) y se definen las características del entorno del incendio: aberturas y accesos de aire y ventilación, consideraciones sobre las características ambientales, accesos principales y de emergencia, etc. (*ver apartado 3.2*).

### **3.1.3. Recopilación de datos e información del incendio simulado**

Se recopilan datos referentes a las variables y parámetros de entrada del incendio simulado (valores posibles a introducir, unidades de medida), reuniendo información procedente de incendios anteriores, ensayos a escala o simulaciones precedentes validadas, para garantizar las validaciones de los modelos conceptual y computacional y, por tanto, la credibilidad de los resultados.

### **3.1.4. Elección del modelo. Verificación y validación**

Se verifica la correspondencia del modelo analizando y contrastando cualitativa y cuantitativamente, parcial y totalmente las soluciones consideradas con la información y datos recopilados de incendios, experimentos, cálculos teóricos o simulaciones validadas precedentes.

### **3.1.5. Diseño, realización y análisis de los experimentos**

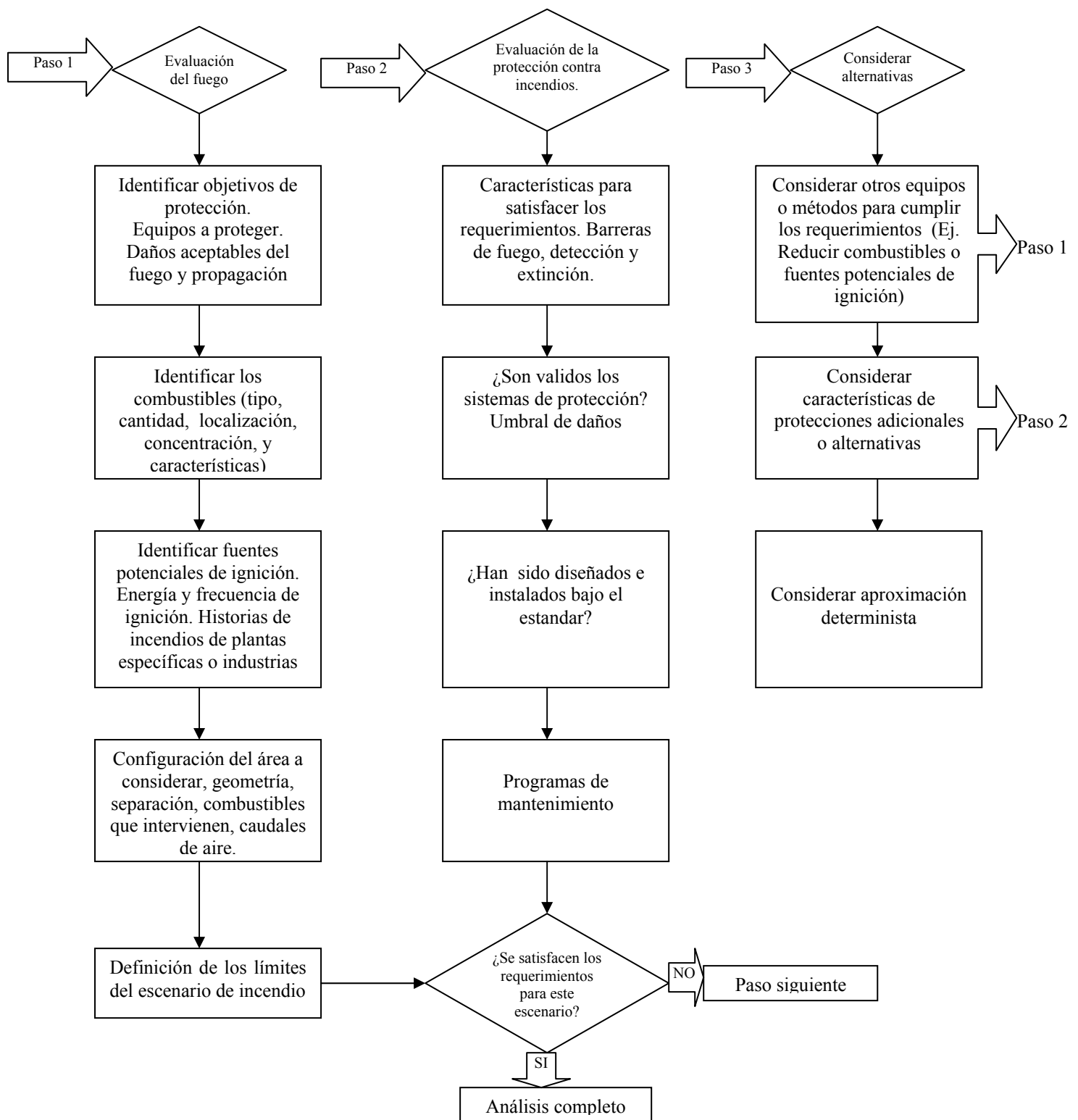
En todos los casos, se definen los rangos y condiciones de cambio de las variables de entrada y cómo se combinarán estos cambios. Además se establecen, si es necesario, los diferentes conjuntos de valores de los parámetros del modelo con los que se debe experimentar.

Lo siguiente es establecer los métodos de procesamiento de las variables de salida (obtención de promedios, tendencias, ajuste de curvas, etc.), valorando en todo momento el cumplimiento de los objetivos específicos de la simulación.

### **3.1.6. Documentación y resumen de los resultado de la simulación**

La documentación de la investigación contempla, generalmente, dos tipos de documentos: un resumen con los aspectos más importantes de la simulación y sus resultados, y una Memoria Descriptiva detallada de toda la investigación y trabajos realizados. Además, se confecciona un informe, frecuentemente en forma de ponencia, para las autoridades competentes implicadas.

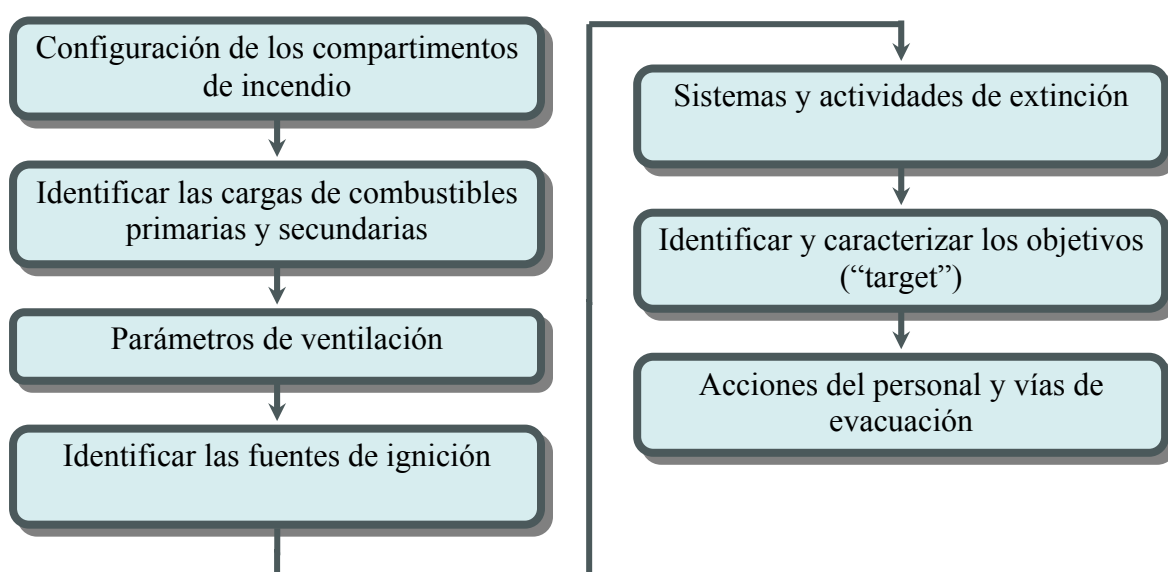
- Identificar el método o aproximación usado en el análisis de ingeniería y los criterios de desarrollo aplicados aportando las referencias correspondientes.
  - Normas desarrolladas por sociedades profesionales reconocidas o instituciones gubernamentales.
  - Publicaciones como *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, la cual es muy reconocida como fuente de información.
- Documentar todas las suposiciones que se hayan aplicado, incluyendo los motivos de su uso.
- Documentar todos los códigos, normas, gráficos o textos como una referencia en el análisis. Incluir todos los datos de entrada, suposiciones y escenarios de apoyo usados en el análisis.
- Describir los resultados del análisis clara y concisamente y representar las conclusiones comparando los resultados de los criterios de desarrollo. Documentar las fuentes principales de incertidumbre y su impacto en el análisis.



**Figura 3.1-2:** Descripción de una aproximación general para establecer los requerimientos de protección contra incendios para una CN.

### 3.2. DESCRIPCIÓN DE ESCENARIOS DE FUEGO

La descripción de un escenario puede ser cualitativa, cuantitativa o una combinación de ambas. Puede comenzar antes de que ocurra la combustión, relacionar la ignición y las fuentes de combustible, y puede describir la incubación, desarrollo, detección, extinción, daños e incluso la restauración de las actividades. La descripción de un escenario puede ser usada de varias formas para postular los efectos potenciales del fuego y desarrollar un plan para mitigar los daños. Un escenario de fuego considerará todas las condiciones operacionales de la planta y los siguientes factores:



*Figura 3.2-1: Proceso de análisis de un escenario de fuego*

#### 3.2.1. Configuración del compartimento

Identificar el compartimento en el que será postulado el escenario de fuego, identificar los compartimentos adyacentes que se puedan ver involucrados en el incendio, y caracterizar todas las fronteras que rodean al compartimento.

#### 3.2.2. Identificar las cargas de combustible primarias y secundarias

El tipo, cantidad, localización, concentración y características de combustión. La carga de combustible debe ser consistente con los combustibles existentes en el área (exactamente representados). Hay que tener especial cuidado con la configuración de los combustibles. Por ejemplo, las bandejas de cables verticales tienen características de



combustión distintas a las horizontales. Hay que ser cuidadoso al seleccionar los HRRs (Tasa de Liberación de Calor) y la duración de combustión.

### **3.2.3. Parámetros de ventilación**

Los sistemas de ventilación mecánica pueden influir en el potencial de los escenarios de fuego. Dependiendo de la localización física las entradas y salidas de los conductos de ventilación, puede afectar a la combustión y a la propagación de la llama en los materiales. La inyección de aire adicional también puede influir en la intensidad del HRR y la duración de la combustión.

### **3.2.4. Fuentes de ignición**

Fuentes situadas en el área y las fuentes transitorias. En el caso de los modelos de fuego es necesaria una fuente de ignición con una magnitud y duración suficiente para iniciar el caso. La fuente de ignición puede ser introducida debido a la acción humana, o fallos en equipos como sobrecalentamiento de transformadores. Los fallos iniciados en cables pueden también ser considerados debido a fallos en fusibles y circuitos de sobrecarga. Las bolsas de materiales transitorios pueden sufrir una combustión espontánea de un inadecuado traspaso de trapos empapados de aceite. La fuente de ignición debe ser realista para cada área evaluada.

### **3.2.5. Sistemas y actividades de extinción**

Identificar las características de los sistemas de detección y extinción de incendios, como los detectores de humo o sensores de calor, o los sistemas de extinción automáticos o manuales y la capacidad de la brigada de incendios.

En la evaluación de los escenarios de fuego se debe elegir arbitrariamente cual de los sistemas de extinción falla y examinar el impacto en los otros elementos de protección.

### **3.2.6. Objetivos (targets) y mecanismos de fallo**

El modelo de fuego puede ser usado para estimar un número de transitorios térmicos del interior del área evaluada. Unos ejemplos pueden ser; temperatura aproximada en los cables más importantes del área, la temperatura de activación de los

dispositivos de detección y extinción, y las temperaturas a las que están expuestas las barreras contra el fuego o los elementos estructurales.

### 3.2.7. Acciones del personal y vías de evacuación

Número de personas y su localización. Posibles rutas de evacuación. Acciones del personal que pueden influir en el escenario del fuego.

Es importante entender que el término usado de “escenario de fuego” tiene un significado muy específico. Se refiere solamente a los *input* y *output* cuantitativos de los cálculos de modelos de fuego. Dependiendo del modelo utilizado, los *input* incluirán lo siguiente:

- Valores físicos relacionados con la geometría y las características del entorno
- Naturaleza y localización de las fuentes de ignición
- Conjunto de combustibles (iniciales e intermedios)
- HRR y tasa de crecimiento del fuego
- Condiciones de ventilación
- Localización de los objetivos (target) y características de daños
- Localización de dispositivos de detección y extinción y sus características de operación.
- Otros datos requeridos por los cálculos del modelo

Las salidas de interés están típicamente relacionadas con los daños en los objetivos (target) y la respuesta de los sistemas de detección y extinción.

### 3.3. TIPOS DE ESCENARIOS DE FUEGO<sup>9</sup>

#### 3.3.1. MEFS (Maximum Expected Fire Scenarios).

Los **escenarios de fuego máximo esperado** son usados para determinar si los criterios utilizados son adecuados en el área de fuego que se está analizando. Los datos de entrada para los modelos de fuego de los MEFS deberían estar basados en lo siguiente:

- Existencia de combustibles en el área de fuego
- Tipos y cantidades de combustibles transitorios que puede haber según la experiencia y las condiciones indicadas en la planta.
- HRR y tasas de crecimiento de fuego para los combustibles existentes y transitorios, según datos reales y conservadores de experiencias de fuegos.
- Ventilaciones con parámetros de operación normales con puertas en posición abierta y cerrada.
- Características de operación de protecciones activas y pasivas.

#### 3.3.2. LFS (Limiting Fire Scenarios)

Los **escenarios de fuegos límite** son los que resultan de las consecuencias desfavorables respecto a los criterios utilizados. Los output de estos escenarios se obtienen manipulando los parámetros de entrada del modelo de fuego hasta que se superan los límites de daño establecidos. Es decir, que están basados en los valores máximos posibles, aunque muy poco probables, de los valores de entrada, o una combinación de estos improbable.

El objetivo de los LFS es analizar el margen entre estos escenarios y establecer el escenario de fuego máximo esperado (MEFS). Los valores de entrada usados por los LFS deberían quedar en el rango de posibilidad. La evaluación del margen entre MEFS y LFS puede ser en gran parte cualitativa, pero proporciona la identificación de puntos críticos en el análisis de manera que pequeños cambios en las entradas del modelo pueden causar consecuencias inaceptables.

---

<sup>9</sup> NFPA 805 - *Performance-Based Standard for Fire Protection for Light Water Reactor Electric Generating Plants* (2006)

---

### **3.4. NÚMERO DE ESCENARIOS A MODELAR**

Normalmente es necesario modelar más de un escenario para cada categoría porque la interacción entre varios parámetros de entrada no siempre es obvia.

La ventilación variable es un buen ejemplo. La mayoría de plantas de generación eléctrica dependen de acciones de los operadores de parada o inicio de los sistemas de ventilación. Cambiando el estado de esta variable se podrían modelar cuatro casos diferentes:

- Aporte y extracción encendidos
- Aporte y extracción apagados
- Aporte encendido y extracción apagado
- Aporte apagado y extracción encendida

El número total de escenarios diferentes requeridos dependerá de las combinaciones de las variables que sean necesarias incluir para realizar un adecuado análisis de las condiciones existentes. Hay que tener en cuenta que debido a las incertidumbres y aproximaciones en los modelos, junto con el comportamiento caótico del fuego, es necesario un buen número de casos para obtener conclusiones razonables.

### 3.5. ESCENARIOS POTENCIALES EN CENTRALES ELÉCTRICAS

La siguiente tabla proporciona una lista de ejemplos de escenarios de fuegos para distintas áreas en centrales nucleares en función de la fuente de ignición y los combustibles para áreas de fuego típicas. Otros factores asociados con la definición del escenario de fuego, como la ventilación, HRR, configuración de combustibles y equipos de planta, carga de combustible y configuración espacial se dan normalmente en centrales específicas y deberían ser confirmadas en la planta.

Fuel	Ignition Source	Type Area
Lube oil <sup>1</sup>	Contact with hot piping surface	Containment
Fuel oil	Contact with hot piping surface	EDG room or building
Turbine lube oil <sup>2</sup>	Contact with hot piping surface	Turbine generator building
Electrical cable insulation <sup>3</sup>	Internal cable fault	Cable spreading room, cable tunnel, or cable penetration area
Electrical wiring, cables, and circuit boards <sup>4</sup>	Electrical fault inside a cabinet or behind vertical control boards	Control room
Charcoal in filter <sup>5</sup>	Spontaneous combustion due to being wetted then heated	Main safeguards filter area
Electrical cable insulation	Electrical circuit fault in switchgear cabinets	Rooms with electrical switchgear
General combustibles	Smoking, hot work, or portable heater malfunction	Warehouse (at beginning of refueling outage)
Transformer oil	Internal electrical fault causing rupture of transformer casing and release of oil that becomes ignited	Yard transformers

Hydrogen, cable insulation, and plastic battery cases	Electrical arc	Battery rooms
Core expansion material	Hot work	Seismic rattle space between two buildings
Office supplies, furnishing, and internal wiring	Smoking or electrical circuit fault	Computer room next to control room
Pump motor windings	Overheating	Various areas
Hydrogen	Electrical arc	Turbine building or outdoor hydrogen storage tanks
General Class A combustibles	Smoking, hot work, or portable heater malfunction	Temporary office trailer
Transient material associated with construction or maintenance	Hot work	Various areas
Lube oil	Contact with hot pipes	Steam-driven pumps
Lube oil	Hot work	Storage tank room or area within turbine building
Fuel oil	Contact with hot metal surface	Diesel fire pump house

Notes:

- (1) Reactor coolant pump lube oil system piping or fitting failure causes release of oil.  
(2) A machine imbalance results in movement of the machine in relation to lube oil system piping, causing pipe failure and release of oil at more than one point along the machine. Oil sprays down from the upper elevation as a three-dimensional fire. Oil accumulates on the floor spreading as a two-dimensional pool fire.

- (3) High-energy internal cable fault in a fully loaded vertical cable tray ignites cable insulation within that tray and propagates to involve adjacent trays.  
(4) Fire produces a large quantity of smoke and potentially toxic combustion products, causing untenable conditions and damage to sensitive computer and electronic components.  
(5) The filter is in service providing radioactive ventilation filtration, with its charcoal at the end of its service life (contaminated), leading to the products of combustion having radioactive contamination.

*Tabla 3.5-1: Escenarios de fuego potenciales en CN<sup>10</sup>*

<sup>10</sup> NFPA 805 - Performance-Based Standard for Fire Protection for Light Water Reactor Electric Generating Plants (2006)

## 4. PARÁMETROS MÁS CARACTERÍSTICOS DE UN FUEGO

### 4.1. HRR (Heat Release Rate)

También conocido como Tasa de Desprendimiento de Calor en una reacción de combustión. El HRR quizás sea el parámetro más crítico y de difícil predicción al determinar las consecuencias de un fuego.

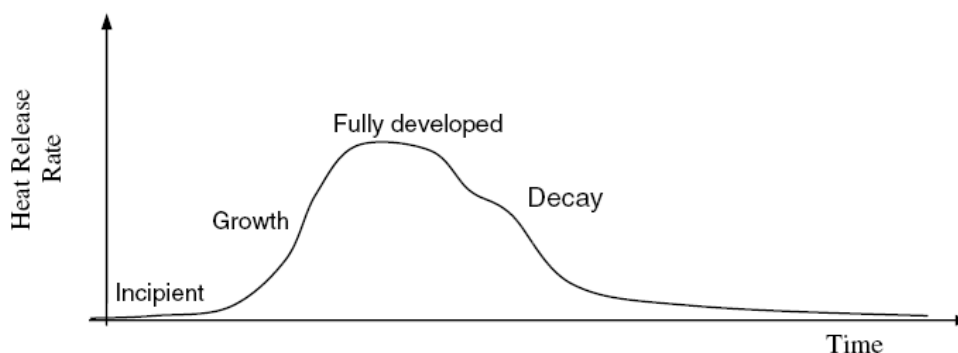
En general, el HRR es calculado usando las propiedades de inflamabilidad de un combustible como el calor de combustión (heat of combustion) [kJ/kg] y la tasa específica de quemado (specific burning rate) [kg/s·m<sup>2</sup>] junto con el área de combustión.

$$\dot{Q}_f = \Delta H_c \cdot \dot{m} \cdot A \quad \text{Ecuación 4.1-1}$$

Desafortunadamente, los modelos matemáticos de las transformaciones físicas y químicas de los materiales cuando arden son todavía objeto de investigación y, por lo tanto, el calor cedido por un fuego como función del tiempo no puede ser expresado con la ecuación anterior para muchos combustibles con configuraciones y condiciones reales. La manera más efectiva para estimar el perfil de HRR de un combustible es probablemente haciendo ensayos de fuego, tales como los designados para determinar la inflamabilidad del material o con ensayos de gran escala. Sin embargo, ambos experimentos son altamente dependientes de la geometría y de las condiciones de ventilación de cada escenario de ensayo y su adecuada aplicación requiere el entendimiento de los parámetros críticos que afectan a la fenomenología. En general, los parámetros que influyen en el HRR son identificados y es recomendable que el análisis verifique que estos valores son apropiados para los escenarios que están siendo analizados.

En las aplicaciones prácticas, el HRR frente al tiempo, como muestra la figura 4.1-1, se divide en cuatro etapas: Inicio, crecimiento, completamente desarrollado y decadencia. En la etapa de inicio el fuego tiene una baja intensidad y su duración puede variar desde segundos a horas. Con las condiciones apropiadas un fuego inicial puede crecer hasta su valor pico de HRR. Dependiendo del combustible y de su composición, el crecimiento a la etapa de completamente desarrollado variará de segundos a minutos. Un fuego completamente desarrollado arderá dependiendo de la cantidad de combustible y de la cantidad de oxígeno que haya en el proceso de combustión. Cuando el combustible se consume, el perfil de HRR pasará

a la etapa de decadencia. La intensidad del fuego decrecerá si no hay suficiente oxígeno de aporte a la reacción.



**Figura 4.1-1:** Evolución del HRR con el tiempo

Estas cuatro etapas no son observadas en todos los fuegos y no es necesario que sean incluidas en todos los análisis, mientras que las condiciones del fuego modelado capture los riesgos del fuego de la fuente de ignición. A continuación se muestra una lista de consejos para el desarrollo de perfiles HRR.

- La etapa de inicio normalmente no se incluye debido a su duración desconocida y porque no genera condiciones térmicas que amenacen la integridad de la habitación.
- Un fuego sale del combustible antes de alcanzar el pico de HRR. Si la cantidad de combustible es conocida, el analista puede escoger el modelo de la etapa de crecimiento hasta que se haya consumido todo el combustible.
- La disponibilidad de oxígeno puede afectar al fuego después de que empiece a crecer. Un fuego puede decaer debido a la baja concentración de oxígeno. Sin embargo, un aporte adicional de oxígeno en una habitación con baja concentración puede causar un incremento de la intensidad del fuego.
- Los perfiles de HRR pueden ser afectados por las composiciones de combustibles en la habitación. Por lo tanto, no siempre resulta fácil desarrollar o encontrar un perfil para una situación específica. Si se selecciona un perfil HRR constante, debería ser el valor pico de intensidad del fuego.



- Los resultados de temperatura y flujo de calor asociados con la etapa de decadencia del fuego sugieren, en general, unas condiciones menos peligrosas que el crecimiento de la etapa completamente desarrollado. Una vez que el fuego comienza a decaer, la temperatura de la habitación decrecerá hasta las condiciones del ambiente. Dependiendo de los objetivos de la simulación, modelar la etapa de decadencia no suele aportar información crítica para decisiones de riesgo.

#### 4.1.1. HRR en combustibles líquidos

Algunas de las Fuentes fijas de fuego, como bombas, generadores diesel, estaciones transformadoras, y turbinas, pueden contener combustibles líquidos. Los valores de HRR para los fuegos procedentes de combustibles líquidos asociados a estas fuentes fijas son calculados en base a las propiedades de inflamabilidad del combustible y al tamaño del vertido usando la *ecuación 4.1-1*. Suponer el valor de HRR constante es razonable ya que los fuegos de líquidos inflamables están caracterizados por un rápido crecimiento hasta la intensidad pico. La duración de los fuegos se puede estimar mediante la división de la masa [kg] de combustible entre la tasa de pérdida de masa [kg/s]. Las propiedades de inflamabilidad para determinados combustibles se muestran en la siguiente tabla.

Fuels	Heat of Combustion MJ/kg	Ideal Mass Loss Rate kg/s-m <sup>2</sup>	Density kg/m <sup>3</sup>
Acetone	25.8	0.041	791
Benzene	40.1	0.085	874
Ethanol	26.8	0.015	794
Fuel oil, heavy	39.7	0.035	940-1000
Gasoline	43.7	0.055	740
Heptane	44.6	0.101	675
Hexane	44.7	0.074	650
JP-4	43.5	0.051	760
JP-5	43.0	0.054	810
Kerosene	43.2	0.039	820
Methanol	20.0	0.017	796
Transformer oil, hydrocarbon	46.4	0.039	760
Xylenes	40.8	0.09	870

**Tabla 4.1-1:** Propiedades de inflamabilidad de combustibles líquidos<sup>11</sup>

<sup>11</sup> EPRI/NRC-RES Fire PRA Methodology for Nuclear Power Facilities: Volume 2: NUREG CR-6850

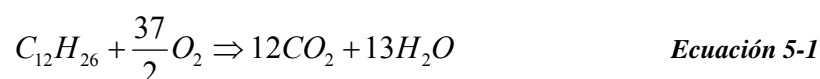


## 5. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

A continuación se realiza un estudio de la sensibilidad del modelo de simulación a las variaciones de algunos de los parámetros de entrada más influyentes en el fuego. Para ello se tiene un recinto cerrado (ver figura) a una determinada temperatura ambiente donde se puede controlar la tasa de renovación de aire mediante una campana de extracción de humos con ventilación forzada y dos ventanas abiertas al exterior del volumen de control en la parte superior. El caudal de extracción de aire será uno de los parámetros de los que se analizará la sensibilidad. Casi a la altura del suelo se tiene un recipiente o “pool” en el que se añadirá una cantidad de combustible en función del espesor y superficie del vertido.

También se estudiarán las variaciones de otros parámetros como la tasa máxima de combustión (*burn\_rate\_max*) con el cual se puede limitar la cantidad de combustible que se quema por segundo influyendo directamente sobre los resultados de la Tasa de Liberación de Calor (HRR) y otros como se verá más adelante.

Con el fin de simplificar los análisis de sensibilidad y habiendo demostrado, con la realización de algunas simulaciones no mostradas en este proyecto, que los resultados difieren notablemente en función de qué tipo de combustible se seleccione, se toma únicamente el combustible TPH cuyas propiedades son bien conocidas y de forma que las conclusiones obtenidas de este análisis puedan ser extrapoladas a las posteriores simulaciones realizadas en el proyecto, en las que se utilizará el mismo combustible.



*Ecuación 5-1*

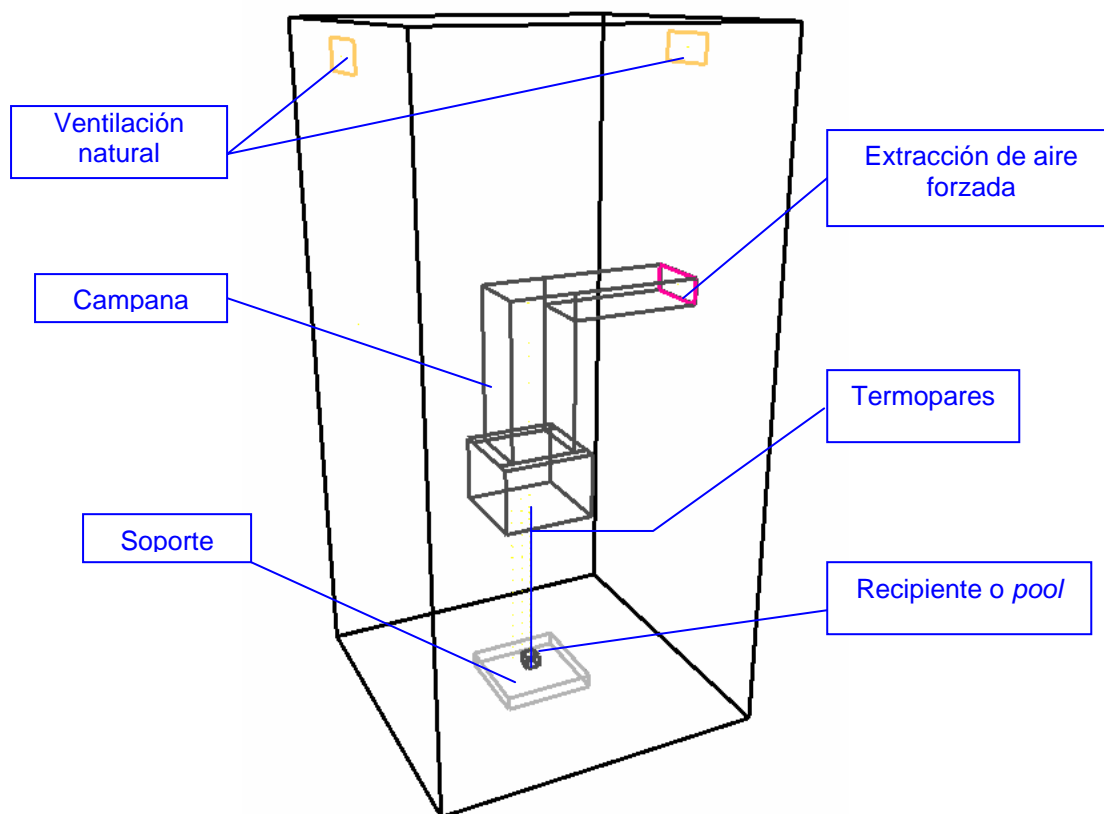
<i>&amp;REAC ID='TPH'</i>	<i>&amp;SURF ID</i>	<i>= 'TPH'</i>
<i>FYI='C_12 H_26'</i>	<i>DENSITY</i>	<i>= 749.</i>
<i>MW_FUEL=170.0</i>	<i>C_P</i>	<i>= 2.4</i>
<i>NU_O2=18.5</i>	<i>KS</i>	<i>= 0.1129</i>
<i>NU_CO2=12.0</i>	<i>TMPIGN</i>	<i>= 200.0</i>
<i>NU_H2O=13.0</i>	<i>PHASE</i>	<i>= 'LIQUID'</i>
<i>RADIATIVE_FRACTION=0.35</i>	<i>HEAT_OF_VAPORIZATION</i>	<i>= 361.0</i>
<i>CO_YIELD=0.011</i>	<i>HEAT_OF_COMBUSTION</i>	<i>= 42000.</i>
<i>SOOT_YIELD=0.041 /</i>	<i>SURFACE_DENSITY</i>	<i>= 7.49</i>
	<i>BURNING_RATE_MAX</i>	<i>= 0.04/</i>

### **5.1. DESCRIPCIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL VOLUMEN DE CONTROL**

- Dimensiones: 10x10x20 m
- Ventilaciones: Hay dos ventanas de ventilación natural localizadas en el centro de dos laterales opuestos. Su parte inferior está a 18,8 m de altura y sus dimensiones son 2x0,8 m. La campana de extracción está conectada a una ventana de ventilación forzada de dimensiones 2x0,8 m, situada a una altura de 12 m.
- Campana de extracción: La campana se extiende horizontalmente desde la ventana de extracción hasta alcanzar el centro del volumen de control de forma simétrica, y descendiendo por un conducto de dimensiones 2x2 m hasta llegar a una altura de 8 m, a partir de la cual continua descendiendo hasta los 6 m de altura pero con dimensiones 2,8x2,8 m.
- Soporte: Debajo del recipiente de combustible hay un soporte de hormigón centrado y de dimensiones 2,8x2x8x0,4 m
- Recipiente: Estará centrado sobre el soporte y sus dimensiones generalmente serán 0,4x0,4x0,4, salvo alguna excepción en la que se cambiará la superficie de la base para analizar la sensibilidad a este cambio.

Tanto la campana como el recipiente se han considerado que está fabricado de hojas de acero de 3 mm de espesor. Las paredes, suelo, techo y soporte tienen las propiedades del hormigón.

Los dispositivos de medición de los parámetros de salida están colocados principalmente centrados en el volumen de control con una separación de 0,2 m desde los 0,8 m de altura hasta los 6 m y con una separación de 0,4 desde los 6 m hasta los 12,4. También hay un termopar en el interior del combustible a 5 mm de la superficie para medir la temperatura del mismo.



*Figura 5.1-1: Geometría y componentes del volumen de control*

## 5.2. PARÁMETROS ANALIZADOS

- **BURN\_RATE\_MAX**: El valor de este parámetro dividido entre la superficie del recipiente de combustible proporciona un valor límite del BURN\_RATE o Tasa de Gasto de Combustible.
- **SURFACE OF POOL**: Superficie del recipiente. La variación de este parámetro lleva consigo un cambio en la cantidad de combustible ya que el espesor del vertido se mantendrán constantes.
- **SURFACE\_DENSITY**: Dividiendo el valor de este parámetro entre la densidad del combustible se obtiene el **espesor del vertido** de combustible.
- **TMPA y TMPO**: Las temperaturas ambientales del interior del volumen de control y del exterior.
- **VOLUME\_FLUX**: El caudal de aire extraído.
- **HEAT\_OF\_VAPORITATION**: Propiedad del material combustible
- **GRID**: Tamaño de malla

Nombre simulación	Burn rate max (kg·s <sup>-1</sup> ·m <sup>2</sup> )	Surface of pool (m x m)	Espesor (m)	Temp. Ambiente (°C)	Caudal de extracción (m <sup>3</sup> /s)	Calor de Vaporiz. (kJ/kg)	Tamaño de malla (m)
S1	0.04	0.4 x 0.4	0.01	30	3	361	0.4
S2	<b>0.021875</b>	0.4 x 0.4	0.01	30	3	361	0.4
S3	<b>0.01875</b>	0.4 x 0.4	0.01	30	3	361	0.4
S4	0.04	<b>0.8 x 0.8</b>	0.01	30	3	361	0.4
S5	0.04	0.4 x 0.4	<b>0.02</b>	30	3	361	0.4
S6	0.04	0.4 x 0.4	0.01	<b>25</b>	3	361	0.4
S7	0.04	0.4 x 0.4	0.01	<b>35</b>	3	361	0.4
S8	0.04	0.4 x 0.4	0.01	30	<b>2.55</b>	361	0.4
S9	0.04	0.4 x 0.4	0.01	30	<b>3.45</b>	361	0.4
S10	0.04	0.4 x 0.4	0.01	30	3	<b>306.85</b>	0.4
S11	0.04	0.4 x 0.4	0.01	30	3	<b>415.15</b>	0.4
S12	0.04	0.4 x 0.4	0.01	30	3	361	<b>0.2</b>
S13	0.04	0.4 x 0.4	0.01	30	3	361	<b>0.1</b>

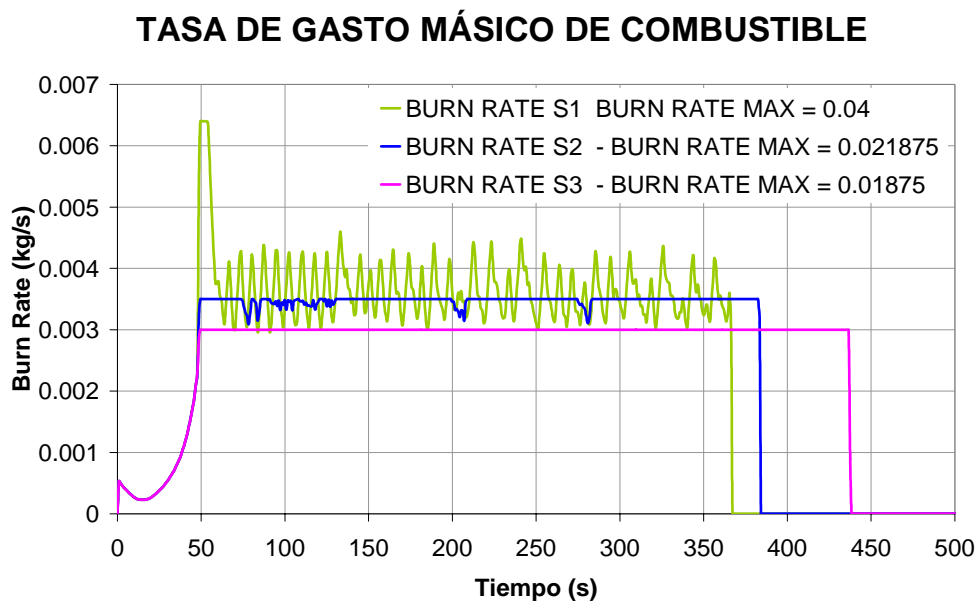
*Tabla 5.2-1: Simulaciones realizadas para el análisis de sensibilidad*

### 5.3. VARIACIÓN DE BURN\_RATE\_MAX

Para S1 se decidió tomar el valor de  $BURN\_RATE\_MAX = 0.04$ , limitando el Burn Rate en un valor de  $0.0062 \text{ kg/s}$ , como se puede ver en el gráfico apenas influye en la evolución de este parámetro calculada por el modelo oscilando de manera más o menos constante en torno a un valor medio de  $0.0036 \text{ kg/s}$ , salvo un pico inicial que alcanza la cota impuesta. La tasa de gasto másico decrece rápidamente cuando se agota el combustible a los  $368 \text{ s}$ .

Para S2 se tomó un valor de  $BURN\_RATE\_MAX$  de forma que el Burn Rate límite fuera el valor medio obtenido en S1, consiguiendo una tasa de gasto másico mucho más estable con un valor casi constante de  $0.0035$ . Sin embargo la duración del fuego aumenta hasta los  $386 \text{ s}$ , un  $5 \%$  más que en S1, debido posiblemente a la eliminación del pico inicial.

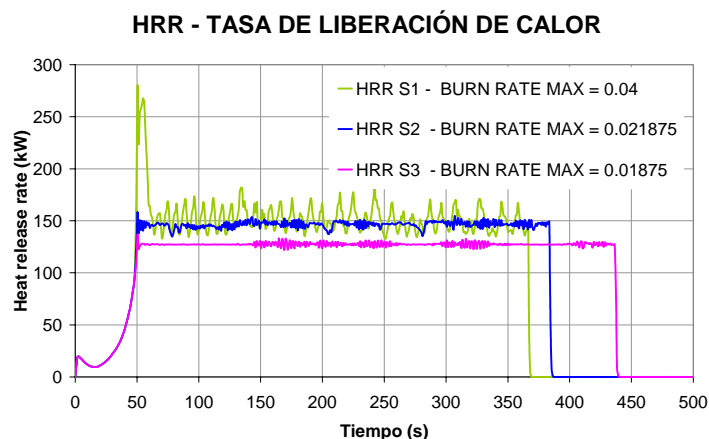
En S3 se toma un valor de  $BURN\_RATE\_MAX = 0.01875$  reducido un  $15\%$  respecto a S2, obteniendo una tasa de gasto másico completamente constante de  $0.003 \text{ kg/s}$  y un tiempo de duración de  $439 \text{ s}$ , es decir, un  $13.7 \%$  mayor que en S2.



*Figura 5.3-1: Representación del Burn Rate frente al tiempo*

Los valores de HRR varían de forma muy similar a como lo hace la tasa de gasto másico.

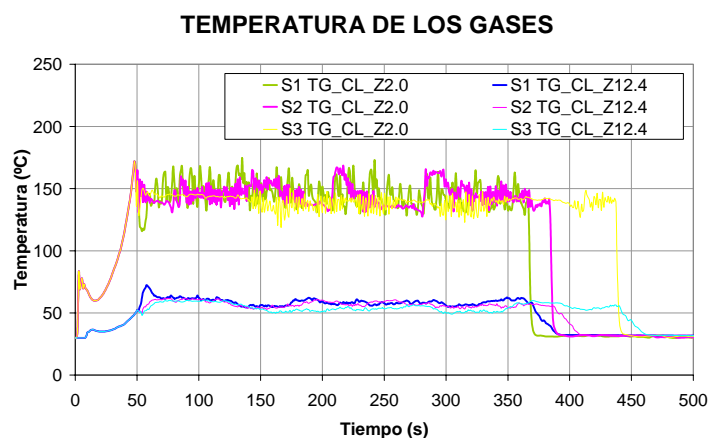
- En S1 se tiene un HRR pico inicial de 268 kW y un valor medio en la zona más estable de 151.5 kW.
- En S2 no hay un valor pico notable de HRR y su distribución es más uniforme que en S1, obteniéndose un valor medio de 146.5 kW (4 % menos que en S1).
- En S3 el valor medio de HRR es de 127 kW, un 13.3 % inferior que en S2.



*Figura 5.3-2: Representación del HRR frente al tiempo*

Las temperaturas medidas a 12.4 m de altura apenas muestran variación de una simulación a otra sin embargo las medidas a 2 metros de altura son las mayores alcanzadas en el volumen de control y su valor medio obtenido en cada una de las tres simulaciones es:

- S1 – 145.33 °C
- S2 – 144.64 °C
- S3 – 139.60 °C (4% menos que S1)



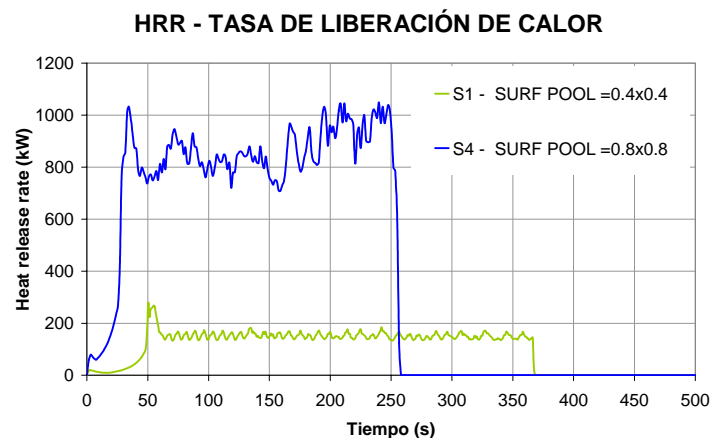
*Figura 5.3-3: Representación de las Temperaturas frente al tiempo*



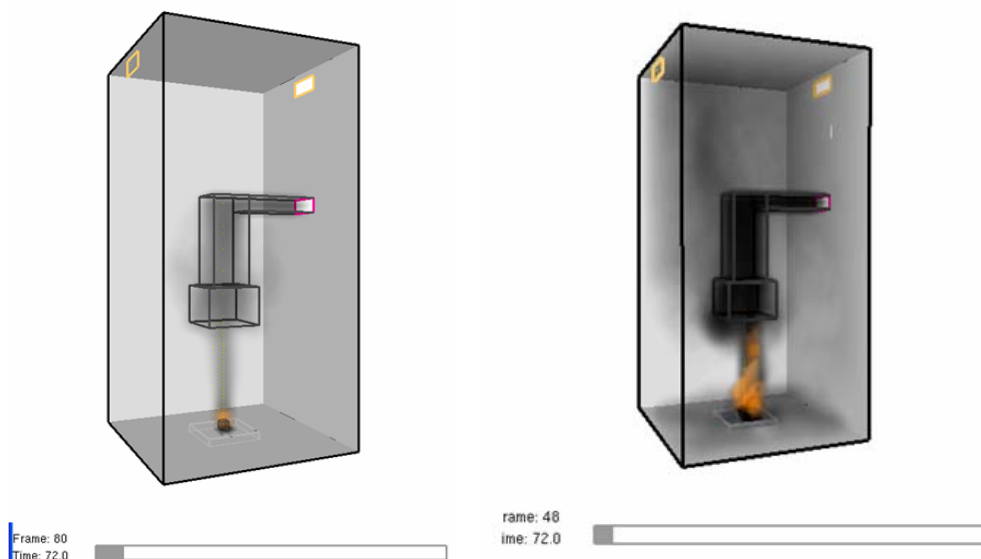
## 5.4. VARIACIÓN DE LA SUPERFICIE

En la simulación 4 se ha tomado una superficie del “pool fire” cuatro veces mayor a la superficie considerada en la simulación 1, manteniendo el espesor constante por lo que la masa de combustible también será cuatro veces mayor. Se observa claramente en la figuras de abajo cómo la variación de este parámetro influye apreciablemente sobre la intensidad y duración del fuego.

- En S1 se tiene un HRR más estable de valor medio 151.5 kW y una duración de 368 s.
- En S4 el HRR es más inestable con un valor medio de 863.4 kW (5.6 veces mayor que en S1) y una duración de 255 s, reducido un 30% respecto a S1 a pesar de la mayor cantidad de combustible.



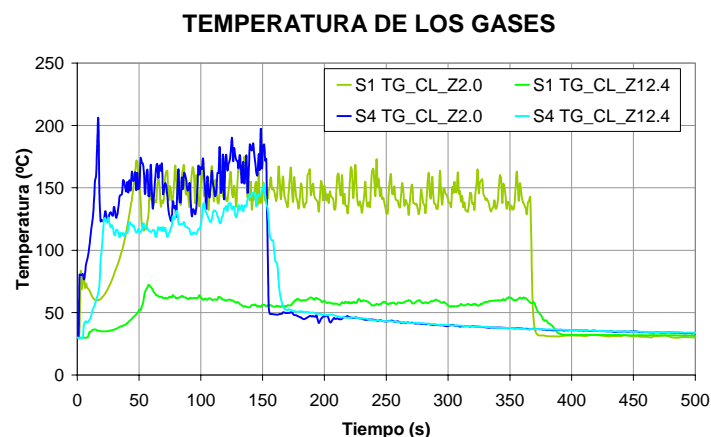
**Figura 5.4-1:** Representación del HRR frente al tiempo



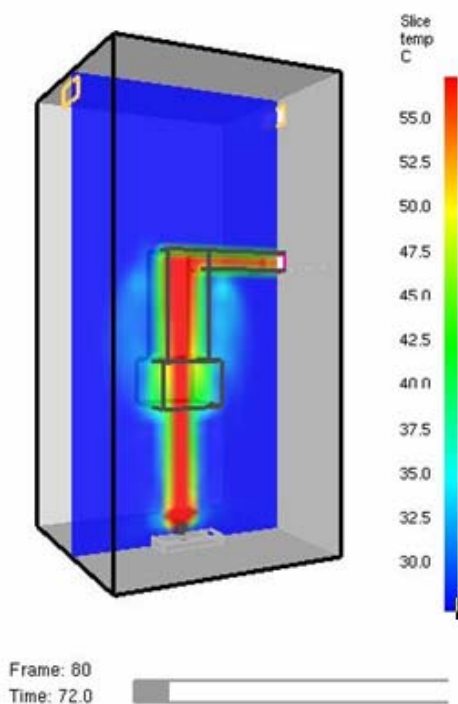
**Figura 5.4-2:** Simulación 1  
0.4 x 0.4 m (t=72 s)

**Figura 5.4-3:** Simulación 4  
0.8 x 0.8 m (t=72 s)

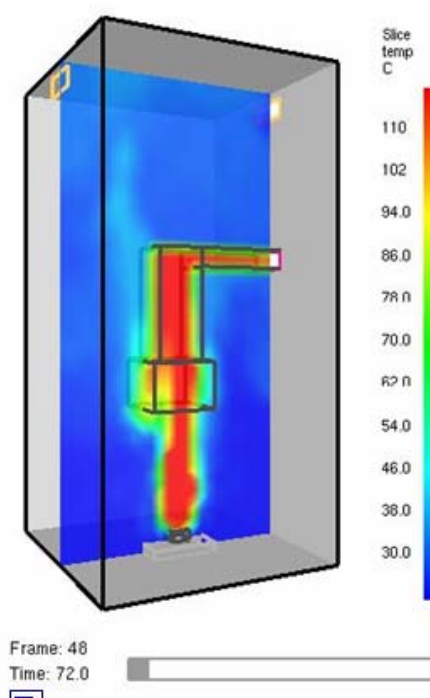
En el caso de las temperaturas la diferencia más significativa entre las dos simulaciones es la temperatura alcanzada a 12.4 metros de altura siendo la máxima en S4 de 150 °C mientras que la máxima en S1 es de 65 °C. Esta diferencia es debida a la altura de la llama como se ve las figuras anteriores.



*Figura 5.4-4: Representación de las Temperaturas frente al tiempo*



*Figura 5.4-5: Simulación 1*



*Figura 5.4-6: Simulación 4*

## 5.5. VARIACIÓN DEL ESPESOR

En S5 el “pool fire” tiene un espesor de 2 cm siendo el doble que el tomado en S1 por lo que la masa de combustible también es el doble. Como se puede observar en las siguientes figuras el único cambio que produce la variación de este parámetro en las simulaciones realizadas es un aumento en la duración del incendio, lo que producirá mayores emisiones de gases y que los obstáculos cercanos alcancen mayores temperaturas.

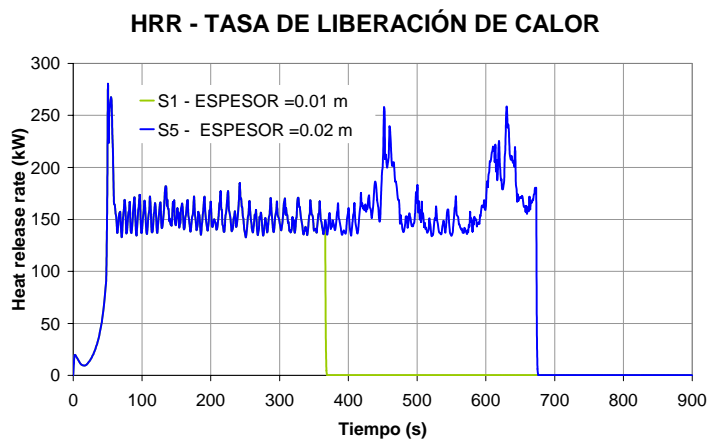


Figura 5.5-1: Representación del HRR frente al tiempo

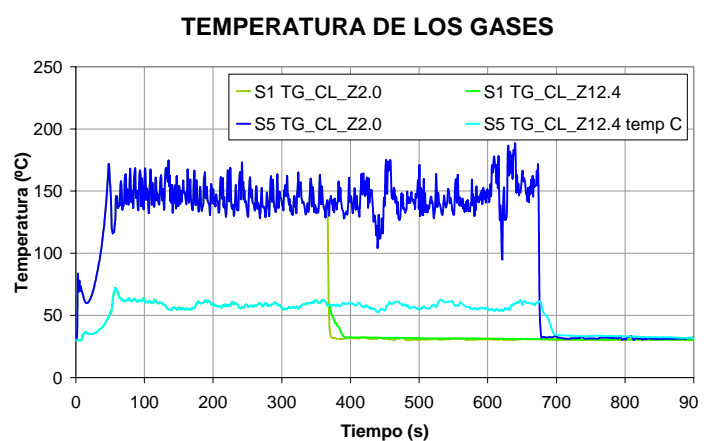


Figura 5.5-2: Temperaturas frente al tiempo

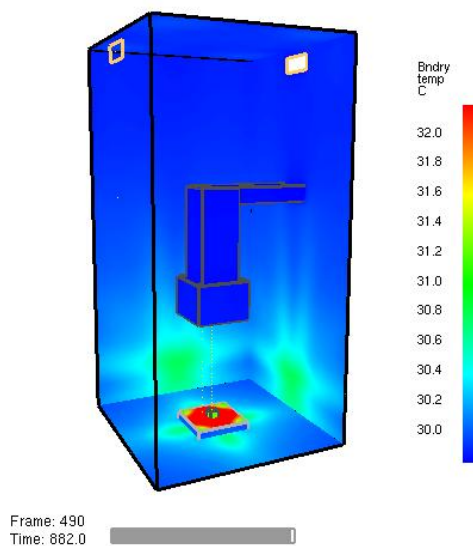


Figura 5.5-3: Simulación 1

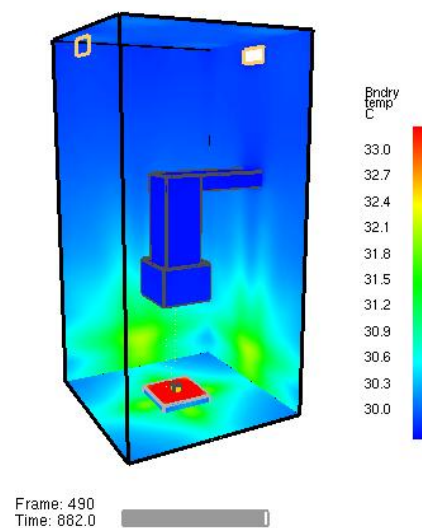
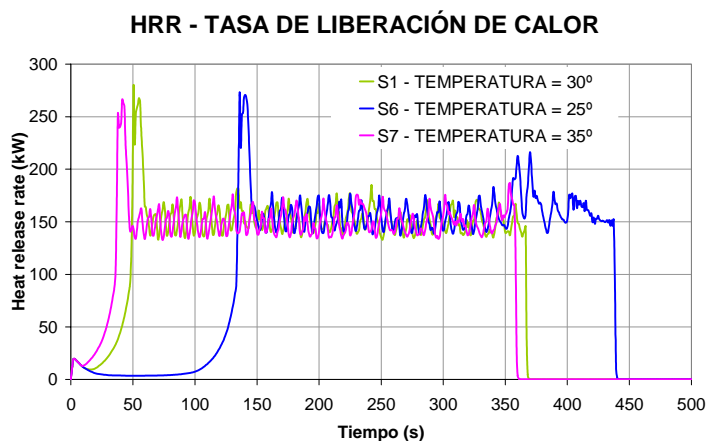


Figura 5.5-4: Simulación 5

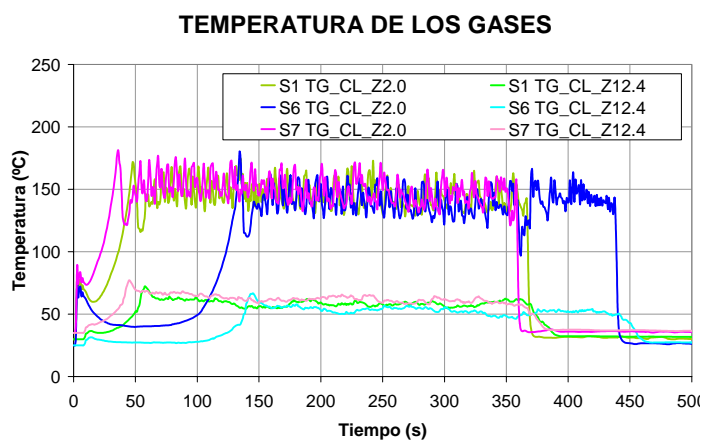
## 5.6. VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA AMBIENTAL

En S6 y S7 se ha reducido e incrementado, respectivamente, las temperaturas del ambiente un 15% respecto a la temperatura considerada en S1 (30 °C). El cambio producido como consecuencia de la variación de este parámetro de entrada en S7 es un ligero adelanto de la combustión en el tiempo, produciéndose el pico de HRR a los 41.4 s. (9.1 s antes que S1). Sin embargo, en S6 debido a las menores temperaturas hay un retraso en la combustión donde el pico de HRR se produce a los 140 s (90 s después que S1).

En las mediciones de las temperaturas también se producen retrasos y adelantos con respecto a S1 pero los valores medios y picos no varían de una simulación a otra.



**Figura 5.6-1:** Representación del HRR frente al tiempo



**Figura 5.6-2:** Temperaturas frente al tiempo

## 5.7. VARIACIÓN DEL CAUDAL DE EXTRACCIÓN

En S8 y S9 se ha reducido e incrementado, respectivamente, los caudales de extracción de aire un 15 % respecto a la caudal considerado en S1 ( $3 \text{ m}^3/\text{s}$ ). La ligera variación de este parámetro en las condiciones en las que se ha realizado la simulación no produce cambios apreciables en la evolución del fuego como se puede observar en las siguientes figuras.

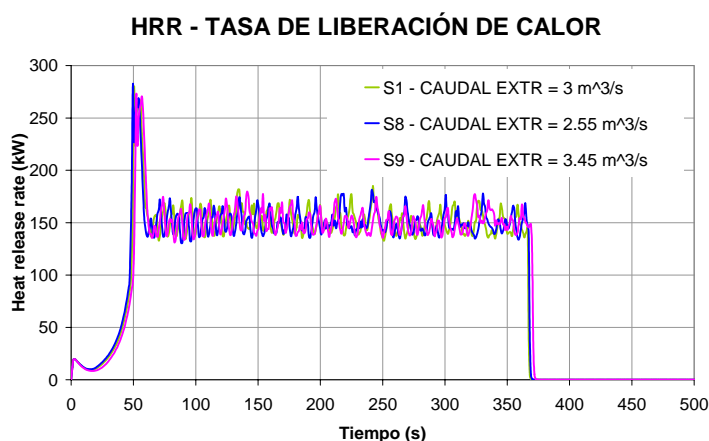


Figura 5.7-1: Representación del HRR frente al tiempo

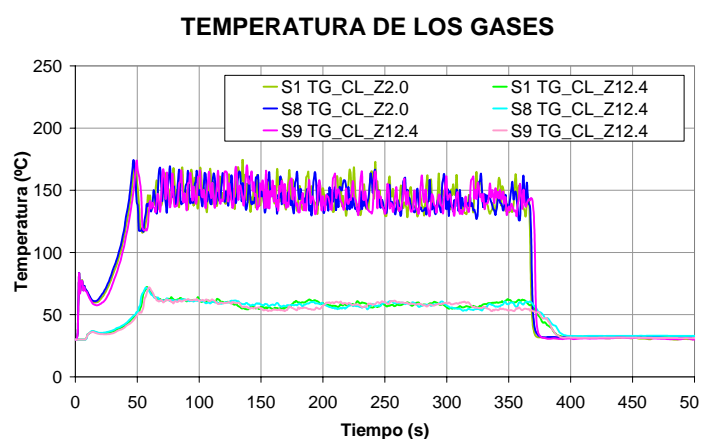


Figura 5.7-2: Temperaturas frente al tiempo

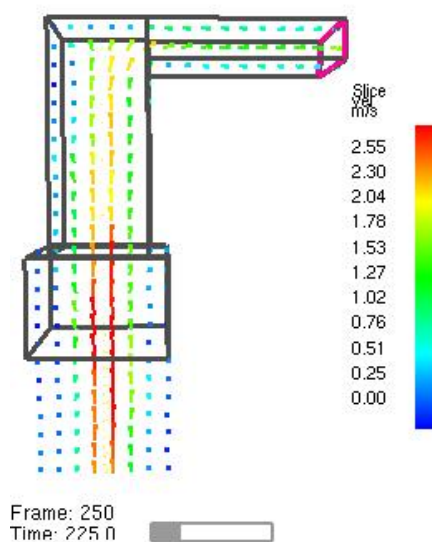


Figura 5.7-3: Simulación 8

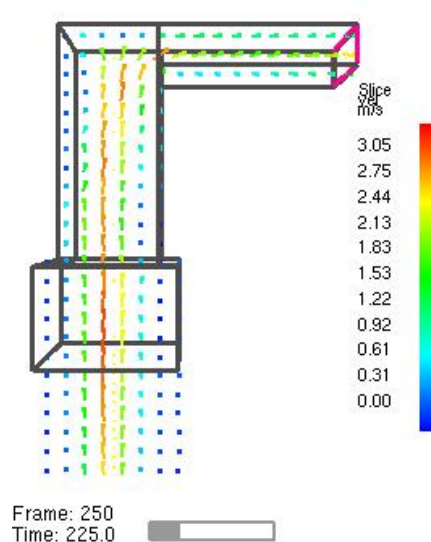


Figura 5.7-4: Simulación 9

## 5.8. VARIACIÓN DEL CALOR DE VAPORIZACIÓN

En S10 y S11 se ha reducido e incrementado, respectivamente, los calores de vaporización del combustible un 15 % respecto al considerado en S1 (361 kJ/kg).

En el caso de S11 no se alcanzan las condiciones suficientes para que el fuego pueda producirse, debido a que hace falta una mayor temperatura para generar la mezcla vapor-aire necesaria para la combustión.

En S10 el valor del Calor de Vaporización es de 306.85 kJ/kg produciéndose un adelanto del inicio de la combustión, produciéndose el valor pico de HRR a los 34.3 s (16.2 s antes que S1) y también se produce una aumento en el valor medio del HRR durante la combustión siendo éste 171.1 kW (12.9 % superior al valor medio de HRR en S1).

También se aprecia que para S10 la duración del incendio es menor (310 s) debido a la mayor tasa de gasto másico de combustible que produce la disminución del calor de vaporización.

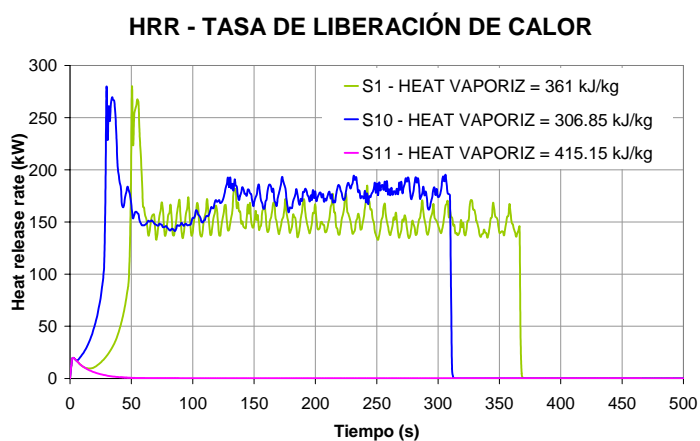


Figura 5.8-1: Representación del HRR frente al tiempo

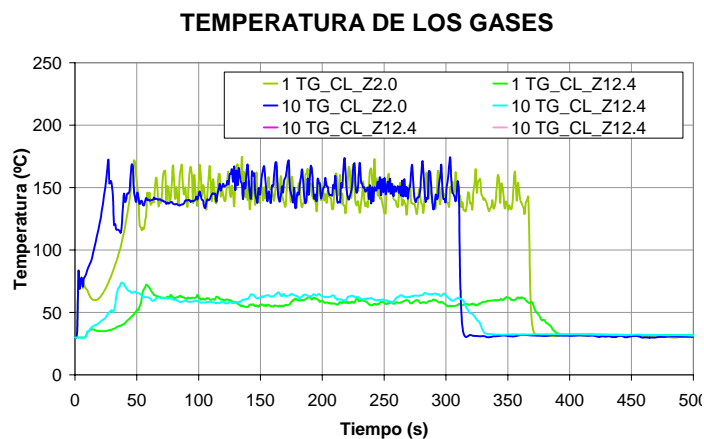


Figura 5.8-2: Temperaturas frente al tiempo

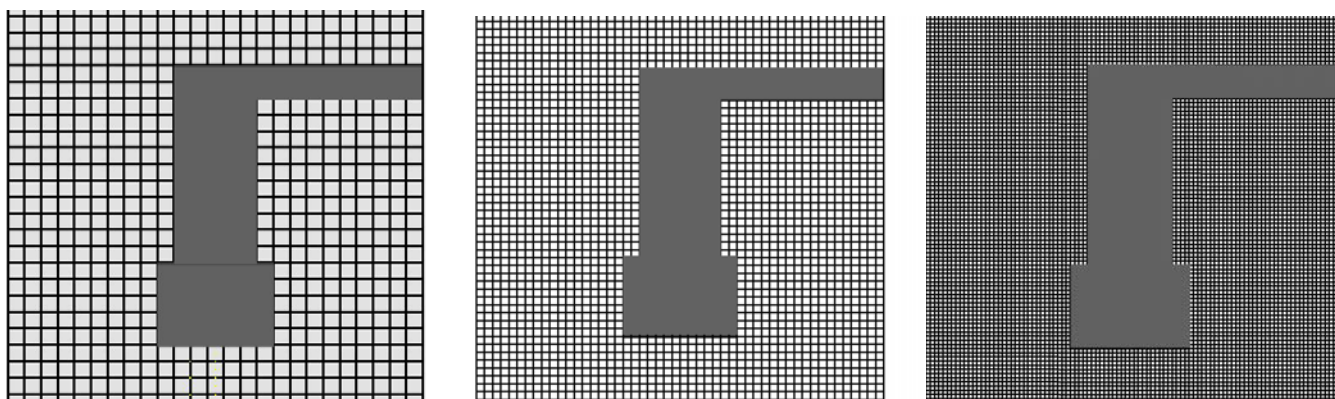
## 5.9. VARIACIÓN DEL TAMAÑO DE MALLA

En S12 y S13 se ha reducido el tamaño de malla a 0,2 m y 0,1 m respectivamente, es decir a la mitad y a un cuarto respecto a S1.

La elección del tamaño de malla adecuado es fundamental para la obtención de resultados lo más próximos posibles a la realidad. El inconveniente principal es que cuanto más fino es el mallado, generalmente, se consiguen resultados más críticos y la duración de la simulación es mayor, esto es lo que hace que no se esté del lado de la seguridad cuando se toman mallados gruesos para no incurrir en tiempos de simulación demasiado elevados. Por este motivo es conveniente realizar simulaciones previas simplificadas con distintos mallados para encontrar un equilibrio.

	Tamaño de malla (m)	Nº de celdas	Tiempo de simulación (min.)
S1	0,4	31.250	34,35
S12	0,2	250.000	706,8
S13	0,1	2.000.000	-

*Tabla 5.9-1: Variación del tamaño de malla*

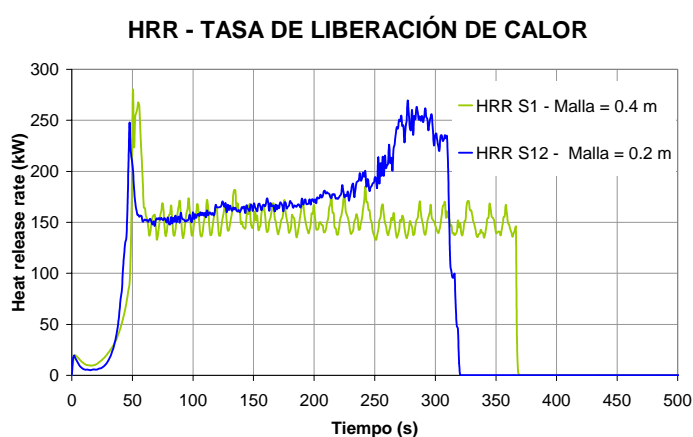


*Figura 5.9-1: Representación de los tamaños de malla simulados (0.4, 0.2, y 0.1)*

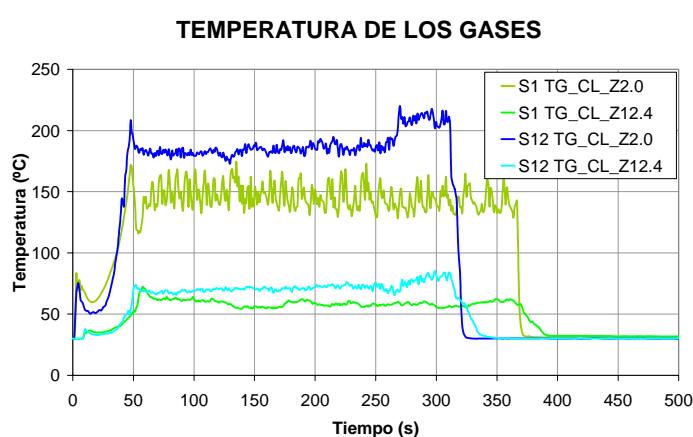
El caso del mallado a 0,1 m ha sido imposible realizarlo debido a la insuficiente capacidad de los recursos informáticos. No obstante, la comparación de los dos primeros casos permite obtener conclusiones sobre la importancia del tamaño de malla.



En la simulación 12 se puede observar que la curva de HHR es creciente con el tiempo y en un momento determinado experimenta un crecimiento brusco, lo cuál, en base a resultados experimentales con combustibles similares en campanas calorimétricas no se ajusta al comportamiento típico de la curva HRR en este tipo de fuegos, ya que lo habitual es que cuando el fuego está completamente desarrollado el valor de HRR oscile en torno a un valor prácticamente constante, como ocurre en el caso de S1. Por este motivo se consideró tomar un tamaño de malla de 0,4 m para el resto de simulaciones, además de por el considerable ahorro computacional.



**Figura 5.9-2:** Representación del HRR frente al tiempo



**Figura 5.9-3:** Temperaturas frente al tiempo

En S12 se observa que las temperaturas alcanzadas son mayores que en S1. Sin embargo también se puede ver que la curva no tiene una pendiente claramente positiva como la de HRR, esto puede ser otro indicio de que no se corresponden con los resultados habituales de experimentos reales en los que los valores de las temperaturas aumentan según lo hace el HRR.

En S1 la temperatura media a dos metros de altura sobre el centro de la llama es de 145,5 °C durante el tiempo en el que el fuego está completamente desarrollado mientras que la de S12 es de 187 °C (un 28,5 % superior).



## 6. SIMULACIÓN DE INCENDIO DE UN TRANSFOMADOR

### 6.1. ESPECIFICACIONES

Un transformador principal (TP) eleva la tensión de generación a 220 kV y se conecta por su lado de alta tensión mediante cable aislado a una subestación de 220 kV,.

Es capaz de funcionar en servicio continuo a plena carga con una sobreexcitación permanente en el núcleo del 105% sin sufrir ningún daño, de acuerdo a lo indicado en la norma IEC 60076-1. Soporta en bornas de baja tensión una tensión de 1,4 veces la tensión asignada durante 5 segundos.

En el interior de los transformadores, se mantiene un refrigerante y aislante, siendo un aceite aislante del tipo mineral refinado (sintético) según la norma IEC 60296, certificado como exento de PCBs. Además en su interior, junto con las estructuras metálicas también existen elementos laminados de papel, telas barnizadas, conductores forrados en tela y barnizados, etc. Estos elementos, al existir algún problema, pueden entrar en combustión.

Existen sistemas de protección, control e interruptores, que poseen una cámara de extinción del arco voltaico, que se origina al interrumpir o cortar la energía eléctrica.



*Figura 6.1-1: Imagen del transformador*

## **6.2. UBICACIÓN Y NORMATIVA DE SEGURIDAD**

Las plantas de generación eléctrica deben estar divididas en áreas de fuego separadas como resultado de una previa evaluación de riesgos con el propósito de limitar la propagación del fuego de un área a otra, proteger al personal, y limitar los daños resultantes en la planta. Las áreas de fuego deben estar separadas unas de otras por barreras de fuego, separación espacial, u otros medios aprobados (ver *Figura 6.2-3*).

En el caso de un transformador exterior la elección del tipo de separación física a emplear se debe basar en la consideración de los siguientes factores:

- Tipo y cantidad de aceite en el transformador
- Tamaño del derrame de aceite postulado (área de la superficie y profundidad)
- Tipo de construcción de los edificios y maquinaria adyacentes
- Potencia del transformador
- Tipo y localización de los sistemas de detección y extinción de incendios

Según la norma NFPA 850<sup>12</sup> se recomienda que los transformadores que contengan más de 1890 litros (500 gal) o más de aceite, esté separado de zonas adyacentes o limitado por muros cortafuegos capaces de confinarlo durante 2 horas (R-120) o por una separación espacial de acuerdo a la siguiente tabla:

<b>Capacidad de aceite del Transformador (Litros)</b>	<b>Mínima separación sin muro cortafuegos (metros)</b>
<1980	1,5
1980-18925	7,6
>18925	15

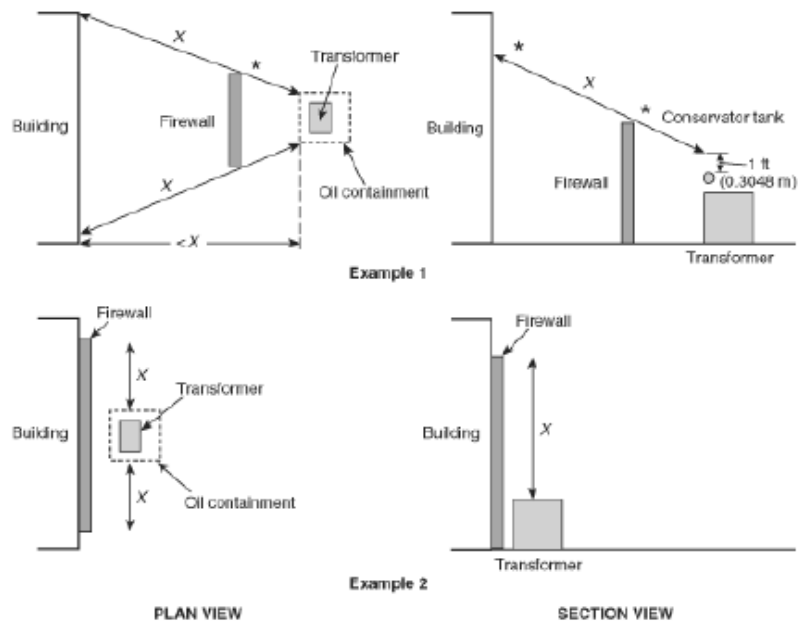
**Tabla 6.2-1:** *Criterio de separación del transformador*

Cuando hay un muro cortafuegos entre un transformador y una construcción se recomienda que éste se extienda vertical y horizontalmente como se indica en la siguiente figura:

---

<sup>12</sup> NFPA 850: “*Recommended Practice for Fire Protection for Electric Generating Plants And High Voltage Direct Current Converter Stations*”

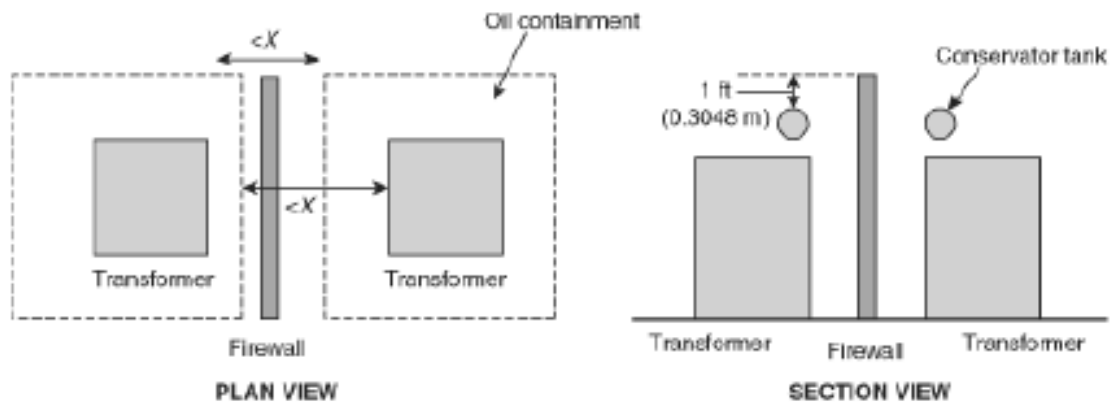
---



X: Mínima separación mostrada en la tabla 6.2-1

**Figura 6.2-1:** Ilustración de separaciones recomendadas

Cuando se construye un muro cortafuegos entre dos transformadores, éste se debe extender al menos 0,31 m (1ft) por encima de la parte más alta del transformador (depósito de expansión) y al menos 0,62 m (2 ft) de los radiadores.



X: Mínima separación mostrada en la tabla 6.2-1

**Figura 6.2-2:** Ilustración de separaciones recomendadas

Los muros cortafuegos también han de ser diseñados para que sean capaces de resistir los impactos provocados por proyectiles como consecuencia de explosiones en el transformador.

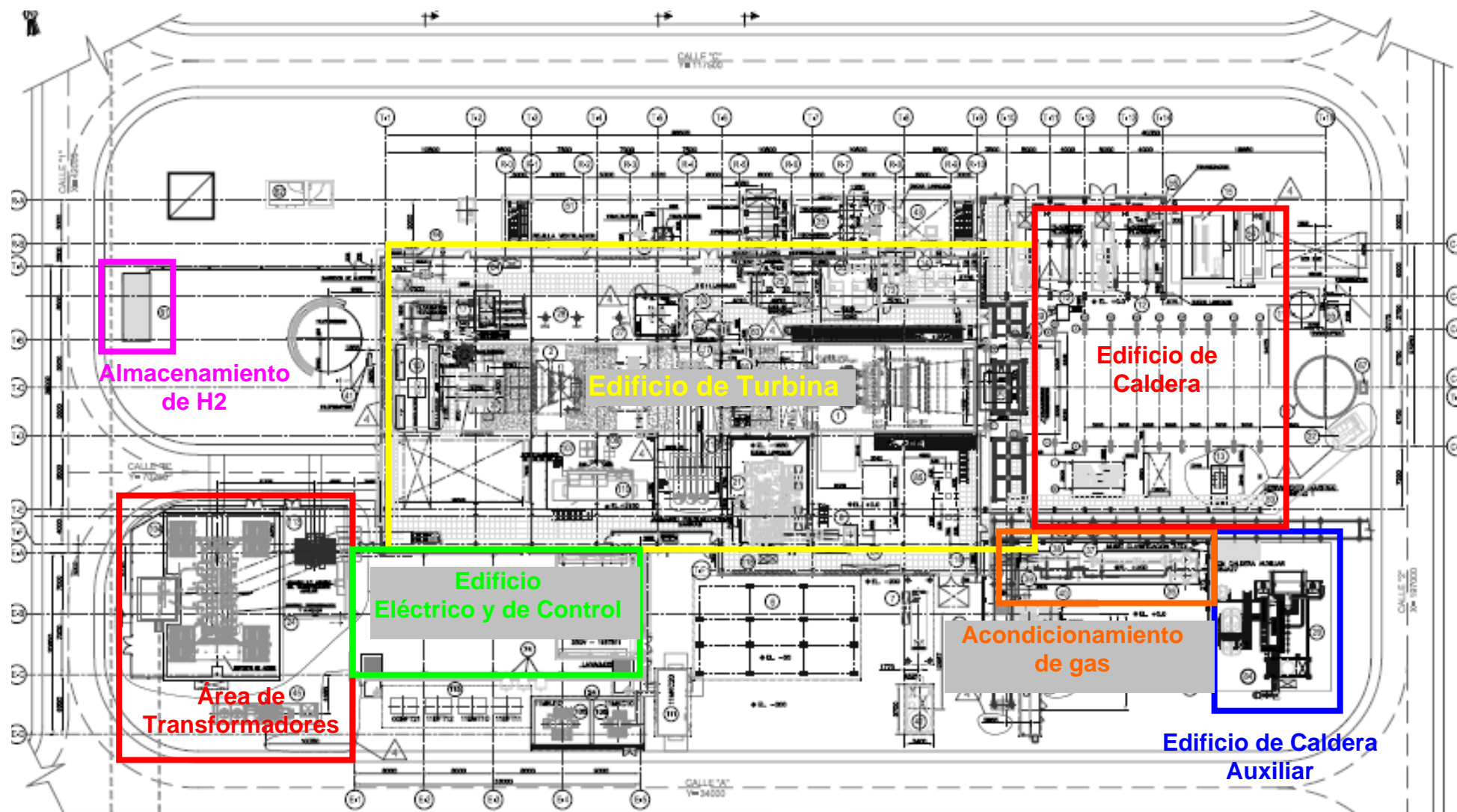


Figura 6.2-3: Disposición General de la Planta de Generación Eléctrica con distintas áreas de fuego

### 6.3. CONDICIONES AMBIENTALES

Las condiciones ambientales exteriores en el lugar de emplazamiento de la central son las siguientes:

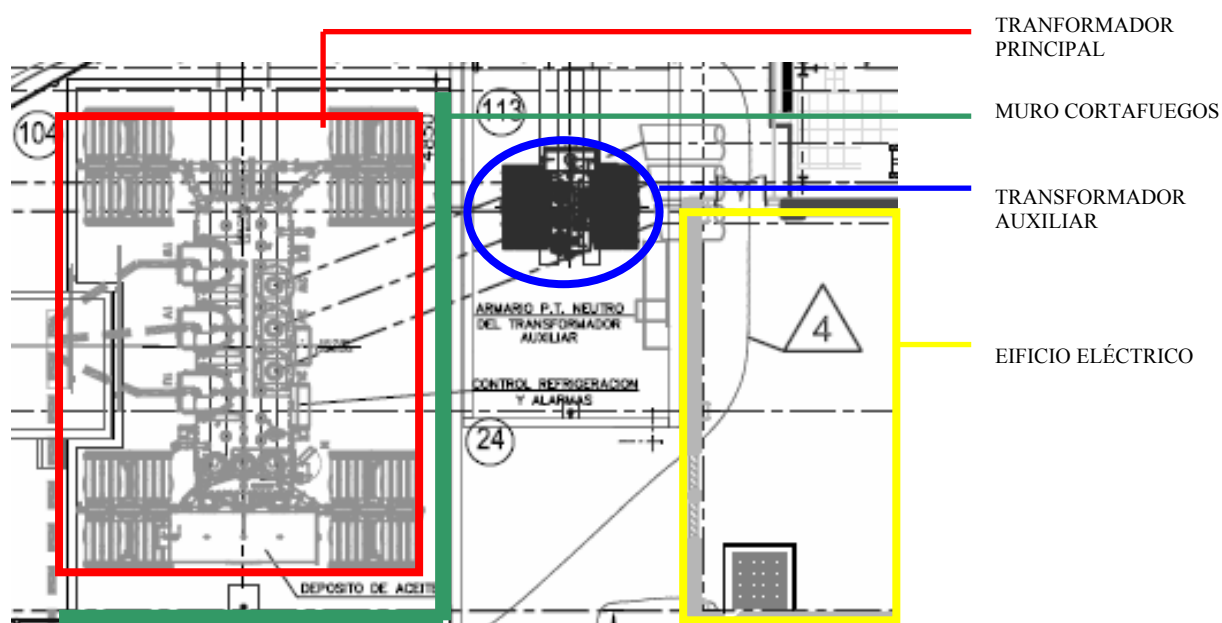
– Altitud aproximada sobre el nivel del mar:	5 m
– Humedad relativa máxima del aire ambiente	80 %
– Temperatura del aire ambiente:	
○ Máxima	35 °C
○ Media de las máximas diarias del mes más caluroso	31,4 °C
○ Media mensual del mes más caluroso (1)	24,8 °C
○ Media anual (1)	17,5 °C
○ Mínima	5 °C
– Exposición solar	Directa
Velocidad máxima del viento para diseño	144 Km/h

## 6.4. DESCRIPCIÓN DEL ESCENARIO DE SIMULACIÓN

### 6.4.1. Geometría del volumen de control

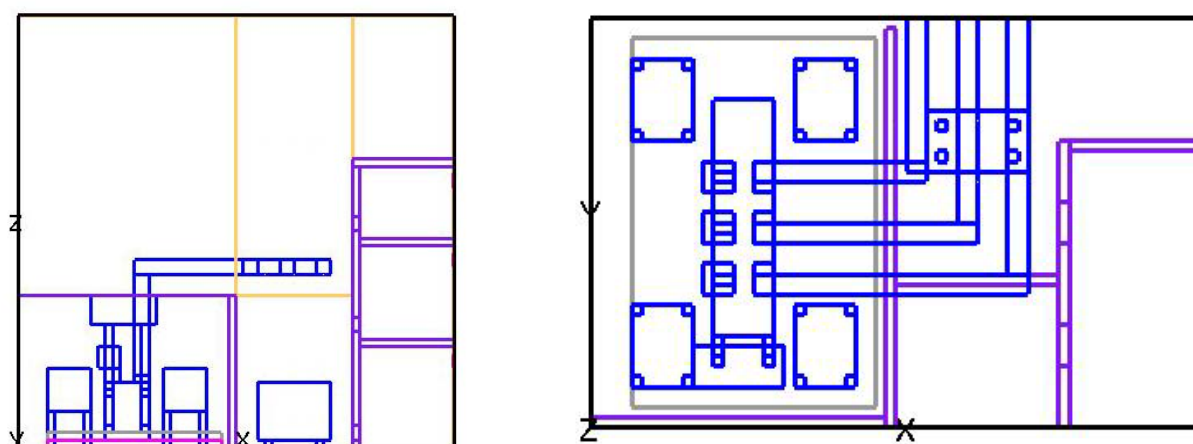
El análisis de la simulación en este proyecto se ha centrado en la zona potencial de incendios correspondiente al área de transformadores y cómo afecta el fuego postulado a la parte más cercana del edificio eléctrico separado por medio de un muro cortafuegos dimensionado según la normativa vista anteriormente. Para poder prescindir del muro sería necesaria una distancia mínima de 15 metros entre el transformador y el edificio eléctrico ya que el trafo contiene una cantidad de combustible superior a 19.000 litros.

Las dimensiones del volumen de control son de 30 m de largo, 20 m de ancho y 30 metros de alto de manera que contiene al transformador principal, el muro cortafuegos y una parte del edificio eléctrico, ya que sería inviable con los medios disponibles realizar simulaciones que abarquen el edificio eléctrico completo sin que el tamaño del mallado sea lo suficientemente fino como para dar resultados fiables.



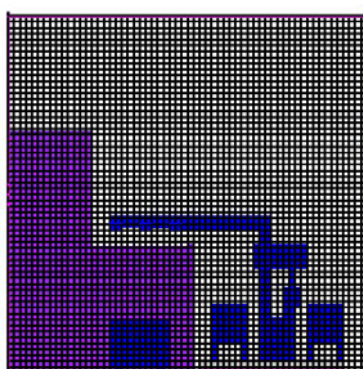
*Figura 6.4-1: Descripción del volumen de control (plano en planta)*

Las dimensiones de todos los obstáculos contenidos en el volumen de control han sido aproximadas según formas rectangulares y de manera que sus contornos coincidan con los bordes de celda. Estas simplificaciones permiten que el modelo reduzca el tiempo de computación. Pueden obtenerse todas las dimensiones a partir de las coordenadas introducidas en el fichero de entrada mostrado en el *Anexo 1*. No obstante las dimensiones más características y cuya variación alteraría los resultados del modelo son las del muro cortafuegos con 19 metros de largo, 10,5 metros de alto y 0,5 metros de espesor y las del cubeto de aceite<sup>13</sup> con una superficie de 12 x 18 m y una profundidad de 1 m.



**Figura 6.4-2:** Descripción del volumen de control (Alzado y Planta en Smokeview)

El tamaño de malla seleccionado ha sido de 0,5 metros, de acuerdo a un equilibrio entre el tiempo de simulación y un espesor del muro cortafuegos para que el modelo tuviera mayor facilidad de cálculo y Smokeview pudiera representarlo adecuadamente. Teniendo, por tanto, un total de 144.000 celdas.



**Figura 6.4-3:** Mallado del dominio

<sup>13</sup> Cubeto del transformador: Foso construido bajo el transformador principal con el objetivo de confinar una posible fuga del aceite de refrigeración.

Las propiedades que se han asignado a los distintos obstáculos representados en la simulación son; para las paredes del edificio eléctrico, suelo y muros cortafuegos, el hormigón. Y para todo lo demás, es decir, los obstáculos que componen los transformadores y las barras de fase aisladas, se ha tomado el acero.

HORMIGÓN		
Propiedades		Valor
Calor Específico	kJ/kg.K	0,736
Densidad	Kg/m3	2430
Conductividad Térmica	W/m.K	1,5
Emisividad	-	0,7
Porosidad		0,05

**Tabla 6.4-1:** Propiedades del hormigón

ACERO		
Propiedades		Valor
Calor Específico	kJ/kg.K	0,48
Densidad	Kg/m3	7850
Conductividad Térmica	W/m.K	58
Emisividad		0,25

**Tabla 6.4-2:** Propiedades del acero

#### 6.4.2. Identificación de las cargas de combustible

El combustible postulado en la simulación es el aceite de refrigeración del transformador principal. Las propiedades de este aceite, que actúa como combustible, han sido objeto de una ardua búsqueda<sup>14</sup>. Esto ha sido así porque los aceites tienen una composición extremadamente compleja, que varía dentro de un rango según sea su finalidad. También existen diferencias por fabricante y lugar de extracción de su materia prima. Sin olvidar que cada fabricante guarda celosamente su composición específica.

El combustible líquido que mejor se adecua al porcentaje en peso del aceite de refrigeración del transformador es el TPH, Tetrapopileno Hidrogenado (C<sub>12</sub>H<sub>26</sub>).

Una molécula de TPH pesaría:

$$12 \cdot 12 + 1 \cdot 26 = 170 \text{ g/mol}$$

Por lo tanto la proporción en peso del Carbono e Hidrógeno son:

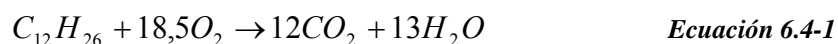
$$C\% = \frac{12 \cdot 12}{170} = 84,71 \%$$

$$H\% = \frac{1 \cdot 26}{170} = 15,29 \%$$

<sup>14</sup> Obtenido de *PRISME SOURCE Program – Analysis report*



De forma que se supone la reacción de combustión ideal del TPH:



Para calcular los coeficientes estequiométricos que se asignan al aceite de refrigeración:

$$Coef_{ESTEQUIMÉTRICO} O_2 = 18,5$$

$$Coef_{ESTEQUIMÉTRICO} CO_2 = 12$$

$$Coef_{ESTEQUIMÉTRICO} H_2O = 13$$

El resto de parámetros que caracterizan el aceite de refrigeración son conocidos y se han tomado de modelizaciones hechas anteriormente con este combustible.

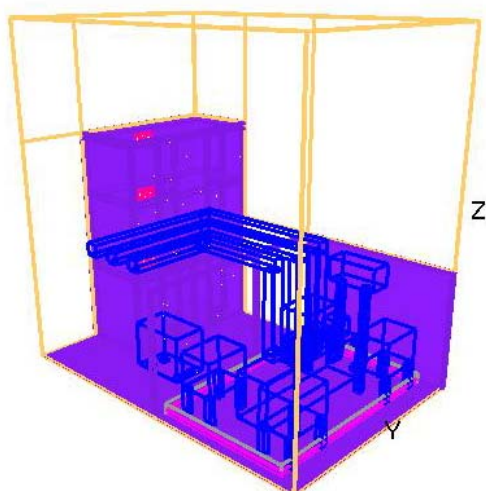
Aceite de Refrigeración		
Propiedades		Valor
Calor Específico	kJ/kg.K	2,4
Densidad	Kg/m3	749
Calor de Combustión	kJ/kg	42000
Calor de Vaporización	kJ/kg	361
Conductividad Térmica	W/m.K	0,1129
Temperatura de Ignición	K	200
Masa Molecular	g/mol	170
Coeficiente Estequiométrico O2	%	18.5
Coeficiente Estequiométrico CO2	%	12
Coeficiente Estequiométrico H2O	%	13

**Tabla 6.4-3:** Propiedades del TPH

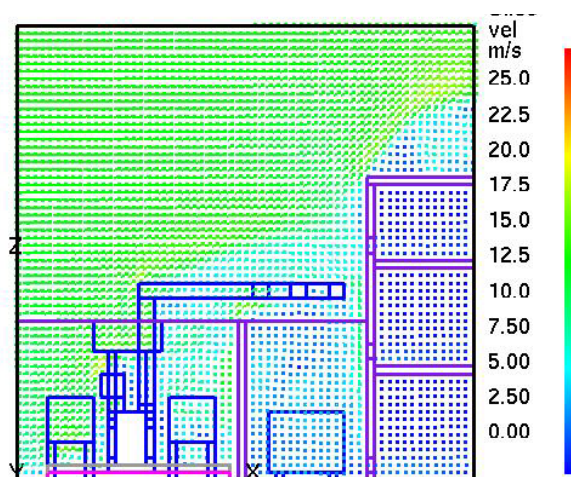
La cantidad de combustible postulada en la simulación es la correspondiente a una profundidad del vertido de 0,5 m, es decir, 80.892 kg de TPH (108.000 litros).

### 6.4.3. Parámetros de ventilación

La ventilación es un parámetro que tiene una gran influencia sobre el desarrollo del fuego y sus consecuencias. En este caso, el transformador se encuentra en el exterior, expuesto a las condiciones meteorológicas, por lo que la mayoría de los límites del volumen de control se han tomado en el fichero de entrada con propiedades de superficie “*OPEN*”, es decir, abiertos al entorno (ver figura 6.3-3).



**Figura 6.4-4:** Superficies “*OPEN*” del volumen de control



**Figura 6.4-5:** Perfil de velocidades al inicio en el plano  $Y=10$  m

Sin embargo, al tener en cuenta los efectos del viento, se ha postulado un perfil atmosférico (“*ATMOSPHERIC*” en el fichero de entrada) en el plano YZ con sentido del eje X positivo con la forma:

$$u = u_0 \cdot \left( \frac{z}{z_0} \right)^p \quad \text{Ecuación 6.4-2}$$

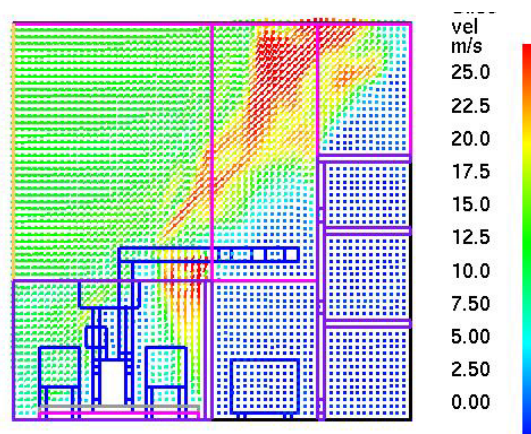
Donde

$z_0$  es la altura inicial del perfil atmosférico (altura igual a 5 m),

$p$  es el exponente del perfil (igual a 0,15), y

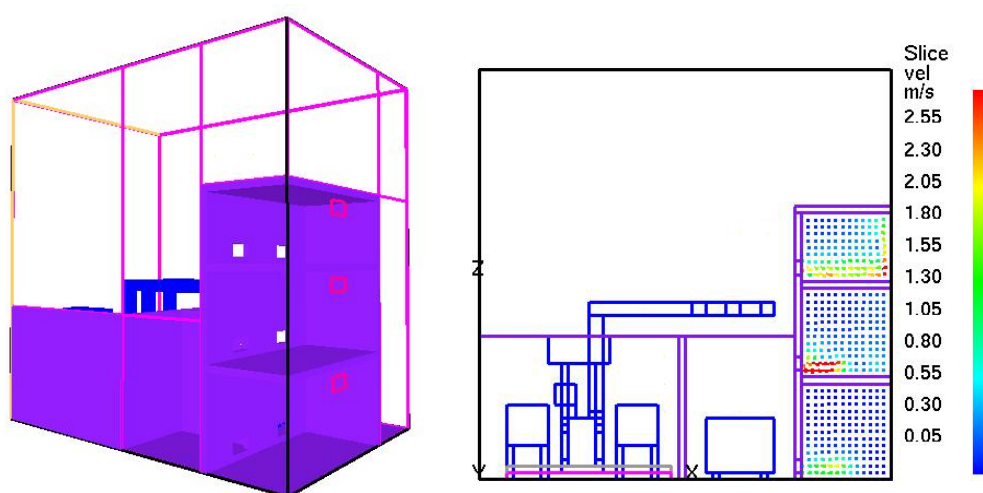
$u_0$  es la velocidad de referencia (igual a 10 m/s)

El sentido del viento se ha considerado de esta manera para realizar un análisis más conservador, ya que así el muro y el edificio eléctrico son alcanzados por las llamas más directamente.



*Figura 6.4-6: Perfil de velocidades con fuego desarrollado*

En cada una de las plantas del edificio eléctrico se han colocado unas ventilaciones de extracción situadas en el límite del volumen de control (recuadros rojos en la figura 6.3-5), con el fin de simular las aperturas o rejillas de ventilación natural en la pared del edificio eléctrico más cercana al transformador. El caudal de aire extraído en cada una de las plantas es de 3,89 m<sup>3</sup>/s.



*Figura 6.4-7: Ventilación edificio eléctrico*

La temperatura ambiental asignada a la simulación es aproximadamente la temperatura media de los meses más calurosos, 30 °C.

#### **6.4.4. Identificación de las fuentes de ignición**

Los transformadores no tienen elementos móviles. A primera vista, ello permite suponer un bajo potencial de riesgo. No obstante, dadas las elevadas tensiones y corrientes, así como la carga térmica, a veces elevada, los transformadores constituyen riesgos particularmente expuestos.

- Fallo de material y de protección a la intemperie (entrada de agua de lluvia)
- Regulador de voltaje averiado, produciendo un recalentamiento excesivo.
- Perdidas de aislamiento, con rebalse del aceite refrigerante, ardiendo con la alta temperatura desarrollada en su interior, saliendo expulsado hacia el exterior y al, nivel del suelo.

#### **6.4.5. Sistemas y actividades de extinción**

Los transformadores de las centrales de generación eléctrica disponen de equipos de extinción de incendios, como los sistemas de agua pulverizada (sistema fijo). Éstos sólo son eficaces en los primeros instantes del fuego.



*Figura 6.4-8: Sistema de agua pulverizada de un transformador*

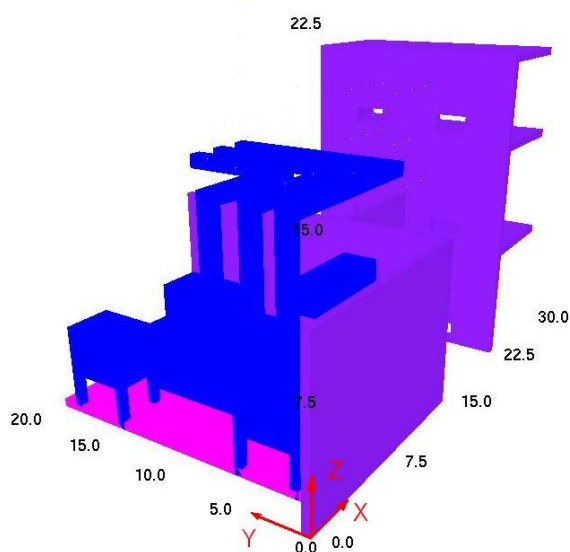
En este proyecto se pretende analizar las consecuencias del fuego completamente desarrollado y cuando esto ocurre, los sistemas de protección y fusibles de media tensión, y posiblemente los fusibles de baja tensión ya han actuado sin éxito. Solo se debe esperar la llegada de la brigada de emergencia de la empresa eléctrica. Debido a ello, no ha sido simulado ningún sistema de extinción de incendios.

#### 6.4.6. Objetivos y puntos de medida

De acuerdo a la norma NFPA 850 los muros cortafuegos han de ser capaces de confinar un incendio durante 2 horas (R-120). Por este motivo el tiempo de simulación es de 7200 s.

La localización de los puntos de medida requirió varias simulaciones previas para formar una idea del comportamiento del fuego y poder situarlos en los puntos más críticos, ya que el número de puntos de medida es limitado (256 columnas de *Excel*). A continuación se detallan los puntos en los que se colocó los dispositivos de medición. También se han realizado varias simulaciones variando solamente los puntos de medida ya que es la única forma de obtener resultados de todos los puntos de interés de este amplio escenario.

- Temperaturas superficiales e internas en los muros cortafuegos.
- Temperaturas superficiales en las barras de fase aisladas.
- Temperaturas superficiales del transformador auxiliar
- Temperatura de los gases de la llama.
- Temperatura de los gases tras el muro cortafuegos.
- Temperatura de los gases en el edificio eléctrico.
- Velocidades de los gases.
  - Sobre la fuente de incendios (línea vertical o “*center line*”).
  - En la entrada de los venteos (“*OPEN*”) del edificio eléctrico.
- Concentración ( $O_2$ ,  $CO_2$  y  $CO$ ) y Temperatura en el edificio eléctrico.
- Visibilidad en el edificio eléctrico.



**Figura 6.4-9:** Sistema de coordenadas del dominio

## 6.5. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN Y CONCLUSIONES

### 6.5.1. HRR del fuego

Como se dijo en el capítulo 4 el HRR es el parámetro más crítico de un fuego, y su valor define la magnitud y las consecuencias o daños que puede causar. También se demostró en el análisis de sensibilidad realizado que este factor depende fundamentalmente de parámetros como la superficie del vertido de combustible (*pool*), el tipo de combustible (calor de combustión) y las condiciones de ventilación (aporte de comburente).

En el caso del transformador, la gran superficie del vertido junto con las condiciones ambientales son, principalmente, las causantes de un crecimiento tan precipitado del HRR hasta llegar a su valor pico en apenas 20 segundos y manteniéndolo durante 1800 segundos (30 minutos), es decir, una cuarta parte del tiempo total de simulación. Estos valores tan elevados del HRR están asociados directamente con la altura de las llamas que, como se puede apreciar en la figura 6-5.1 llegan a rozar los 30 metros.

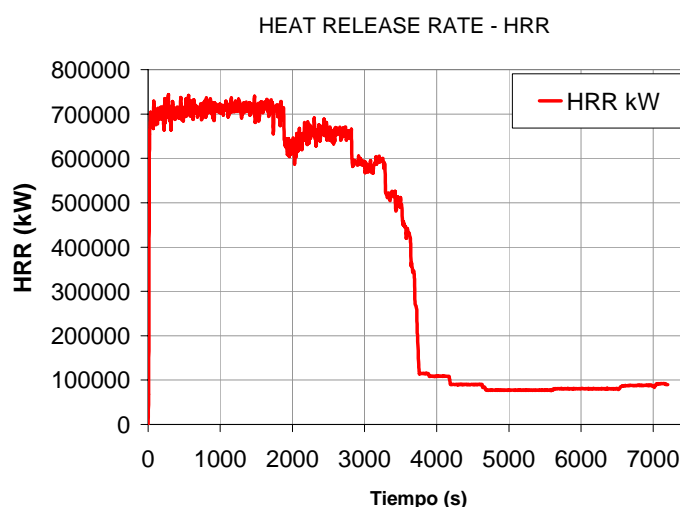
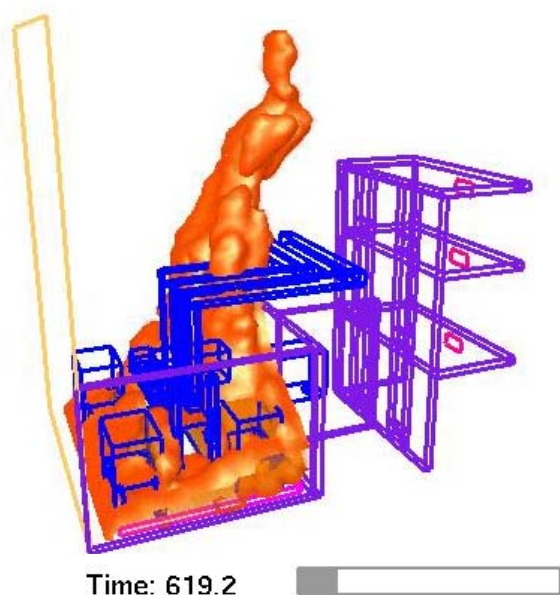


Figura 6.5-2: Gráfica de la Tasa de Liberación de Calor

Figura 6.5-1: Representación de la magnitud del incendio en Smokeview

Después de los 1800 segundos el HRR comienza a disminuir, pudiéndose distinguir varios estados sucesivos de uniformidad, cada uno de ellos de menor duración, hasta alcanzar de nuevo un estado en el que el HRR se estabiliza desde los 3700 segundos hasta el final de la simulación.

Se observa con mayor claridad que dichos estados de uniformidad se corresponden con los escalones representados en la gráfica del *Burn Rate* (figura 6.5-3) ya que, como se pudo comprobar en el análisis de sensibilidad, ambos parámetros están muy ligados.

El valor del parámetro *BURN\_RATE\_MAX*, el cual permite prevenir un exceso de gasto másico de combustible, es  $0,1 \text{ kg}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$ . Teniendo en cuenta que la superficie del derrame de combustible es  $216 \text{ m}^2$  ( $12 \times 18$ ), el valor máximo admisible de *Burn Rate* es de  $21,6 \text{ kg/s}$ . El valor de gasto másico que se alcanza en la simulación es  $20,65 \text{ kg/s}$  por lo que no llega a ser limitado.

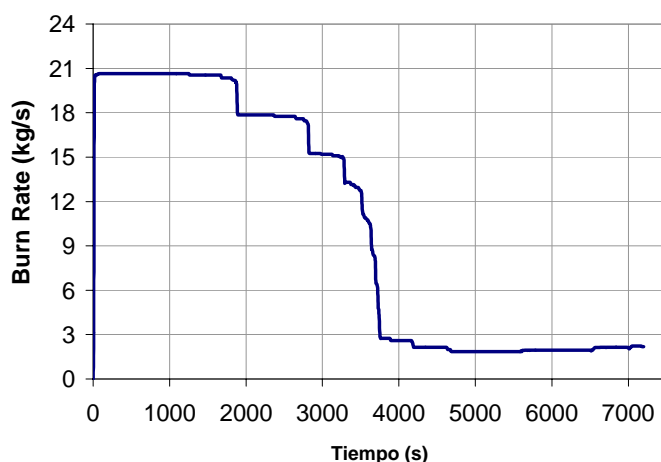


Figura 6.5-3: Burn Rate o Tasa de gasto de combustible

Integrando los valores del *Burn Rate* desde el instante inicial hasta el final de la simulación, es posible obtener el consumo acumulado de combustible, representado en la figura 6.5-4. Hay derramados un total de  $80.892 \text{ kg}$  de combustible, de los cuales, en  $7200$  segundos se consumen  $74.538$  (el  $92,1\%$ ).

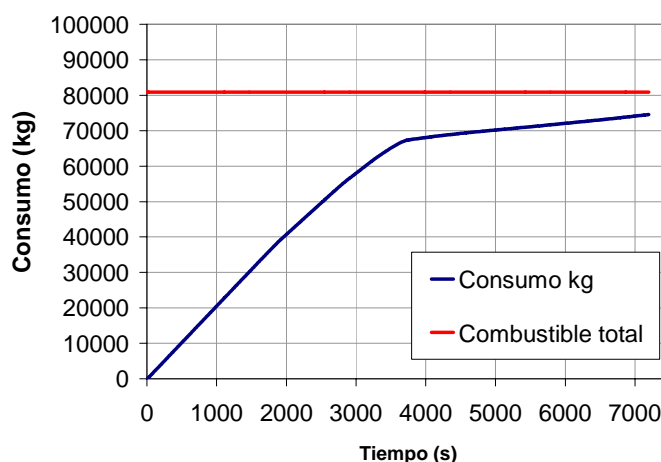


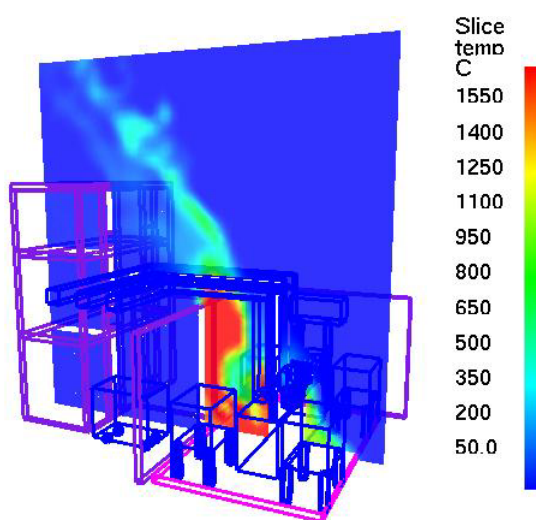
Figura 6.5-4: Consumo acumulado de combustible



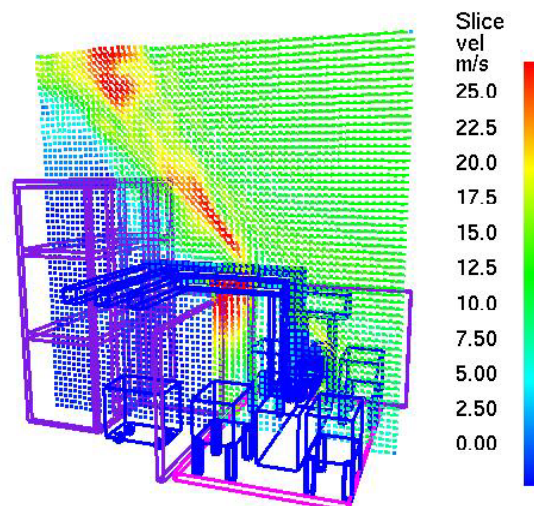
### 6.5.2. Temperaturas y velocidades de los gases de la llama

La temperatura máxima que alcanzan las llamas es aproximadamente 1800 °C, localizadas en el plano  $X = 12$  m y a una altura de 10,25 metros (ver figura 6.5.7). Como era de esperar estas temperaturas tan elevadas se concentran en la zona interior del muro cortafuegos. Al igual que en el caso del HRR, las temperaturas comienzan a decaer una vez que se han sobrepasado los 1800 segundos.

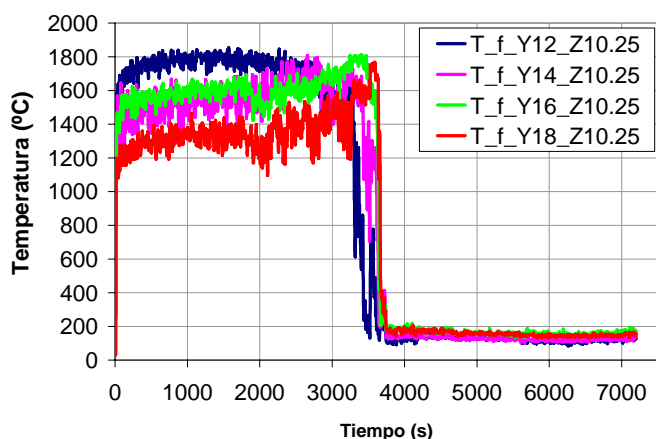
Las velocidades máximas alcanzadas por los gases de la llama oscilan sobre los 20 m/s, e incluso llegan alcanzarse picos de 25 m/s, como se ve en las figuras 6.5.6 y 6.5.8.



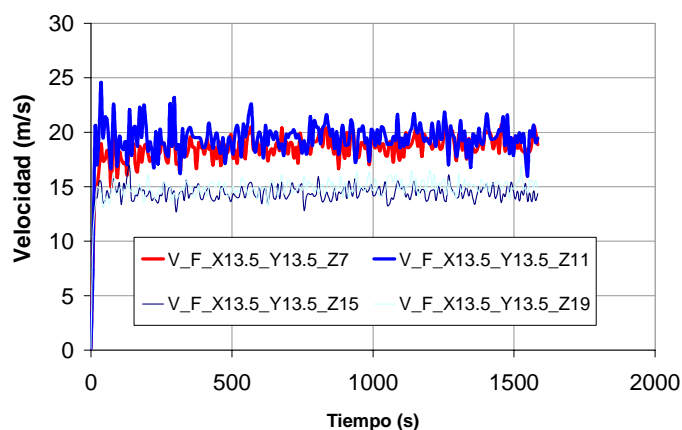
**Figura 6.5-5:** Representación de la temperaturas de la llama en el plano  $Y=10$



**Figura 6.5-6:** Representación del perfil de velocidades en el plano  $Y=10$



**Figura 6.5-7:** Temperaturas de la llama en el plano  $X=14$



**Figura 6.5-8:** Velocidades de los gases de la llama en el plano  $X=13,5$

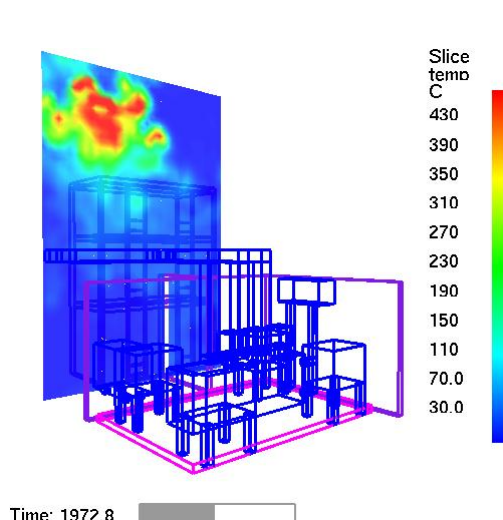


### 6.5.3. Temperaturas de los gases tras el muro cortafuegos

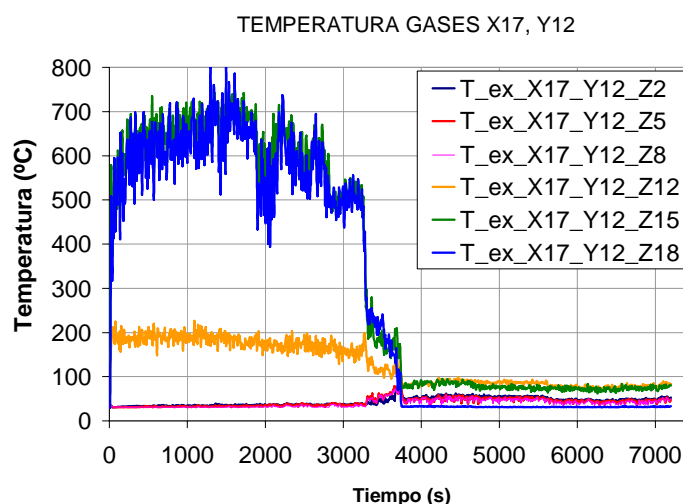
Uno de los objetivos principales del muro cortafuegos es proteger a los edificios y componentes cercanos a la fuente del incendio de las altas temperaturas generadas por el fuego e intentar que su funcionamiento se vea afectado lo menos posible. Con las figuras 6.5-9 y 6.5-10 es posible hacerse una idea de la forma en que el muro cortafuegos aísla las altas temperaturas.

En la 6.5-10 se han medido las temperaturas a distintas alturas y a una distancia de 2 metros de la cara no expuesta del muro. Los puntos que están situados por debajo de la cota máxima del muro (10,5 metros) no experimentan grandes variaciones hasta los 3200 segundos aproximadamente, coincidiendo con el descenso de la altura de llama, en que la temperatura empieza a incrementar llegando a un máximo de 73 °C para el punto que se encuentra a 8 metros de altura.

Para el punto colocado a 12 metros de altura, a pesar de estar ya por encima del muro cortafuegos, se puede apreciar como el muro sigue protegiéndolo en cierta medida (200 °C). Los puntos de cotas mayores (15 y 18 metros) están fuera de la zona de influencia del muro, llegando a alcanzar valores de hasta 800 °C.



**Figura 6.5-9:** Representación de la temperatura tras el muro cortafuegos



**Figura 6.5-10:** Gráfica de las temperaturas tras el muro cortafuegos

#### **6.5.4. Temperaturas del muro cortafuegos**

Los muros cortafuegos son elementos no portantes, es decir, que soportan únicamente su propio peso, por lo que su eliminación o derrumbamiento no tiene especial importancia desde el punto de vista estructural. Sin embargo desde el punto de vista funcional, ambiental y de seguridad contra incendio tienen una gran importancia.

Como dato de interés se puede decir que en muros portantes el hormigón comienza a deteriorarse a temperaturas superiores a los 380 °C en periodos prolongados de tiempo. A los 400 °C se produce una pérdida de resistencia entre 15-25 %, según sea de áridos calizos o silíceos. Por encima de los 800 °C, deja de poseer una resistencia a la compresión viable, y se debilitará en mayor medida al enfriarse cuando se apague el fuego.

A diferencia del acero, el hormigón está expuesto al fuego, por tanto las evoluciones son más complejas. Además de las variables propias de cada incendio (carga de combustible, ventilación, etc.), la variación en los resultados del hormigón puede deberse a una serie de factores intrínsecos como la densidad, la porosidad y el tipo de árido.

Básicamente, los principales efectos del fuego en el hormigón armado, podrían resumirse en:

- Daños de adherencia por salto térmico entre las armaduras de acero y el hormigón que las recubre.
- Pérdida significativa de espesor del recubrimiento del hormigón, debida al efecto *spalling* o desprendimiento por explosión del hormigón.
- Una disminución de la resistencia del hormigón cuando su temperatura supera los 380 °C durante periodos prolongados.
- Una disminución de la resistencia de las armaduras de acero cuando la temperatura supera los 250 °C.

Es muy importante garantizar el espesor del hormigón de recubrimiento. Además de esto, es posible limitar la temperatura del hormigón (y del acero) para retardar o evitar que alcance su temperatura crítica mediante métodos de protección pasiva (recubrimiento). Esta acción impide el desmoronamiento repentino de una estructura, inmediatamente después de un periodo especificado de estabilidad o de un incendio de larga duración.

Los muros cortafuegos deben soportar la dilatación por el calor, para ello, se construyen más gruesos de los que exigen la clasificación normal de resistencia al fuego, incorporándoles contrafuertes o pilastras en función de la longitud o altura que refuercen su estabilidad.

La deformación depende de:

- La diferencia de temperatura entre las superficies interior y exterior del muro, que a su vez depende de la conductividad térmica del propio muro.
- La altura del muro y la distancia entre apoyos.
- El espesor del muro; un muro delgado se deforma más que uno grueso.
- El coeficiente de dilatación del material.

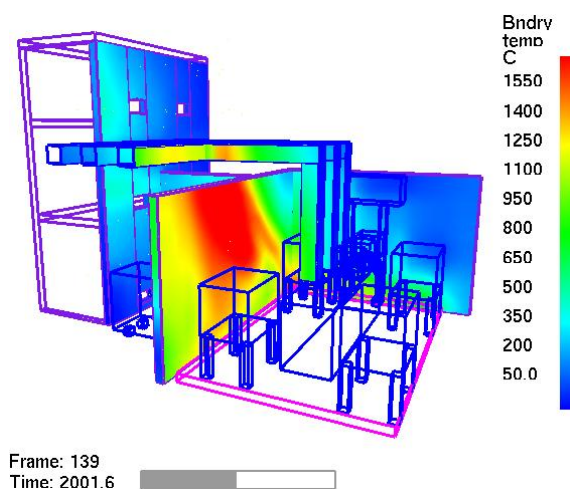
En las páginas siguientes se pueden ver las gráficas de las temperaturas superficiales tanto de la cara expuesta como de la posterior y también la evolución de la temperatura interior del muro.

Después de realizar una simulación de prueba se determinó que la zona longitudinal del muro donde se alcanzaban mayores temperaturas con las condiciones dadas es desde  $y = 12\text{ m}$  hasta  $y = 18\text{ m}$ . Por lo que los puntos donde se han tomado las medidas de temperatura son para valores del eje de coordenadas “y” igual a 12, 14, 16 y 18 metros. Para cada uno de estas zonas se han seleccionado tres alturas (2, 6 y 10,25 metros) y también la superficie superior del muro, ya que estas variarán en función de la altura de las llamas.

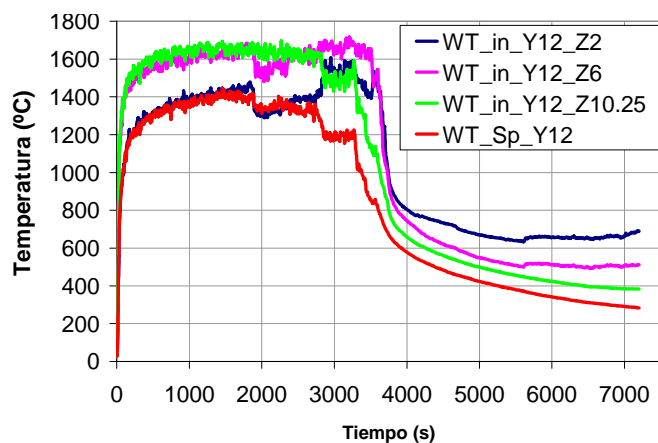
Las temperaturas más elevadas alcanzadas por el muro se producen en la cara expuesta al fuego para una altura comprendida entre 6 y 10,25 metros de altura, llegando a superar los 1600 °C durante los primeros 40 minutos aproximadamente.

Se puede ver cómo el enfriamiento de la zona más alta del muro se produce más rápidamente debido al descenso de la altura de las llamas mientras que la temperatura a dos metros de altura e incluso a seis se mantiene uniforme después de los 5000 segundos ya que el incendio después de ese tiempo sigue activo pero con menor intensidad.

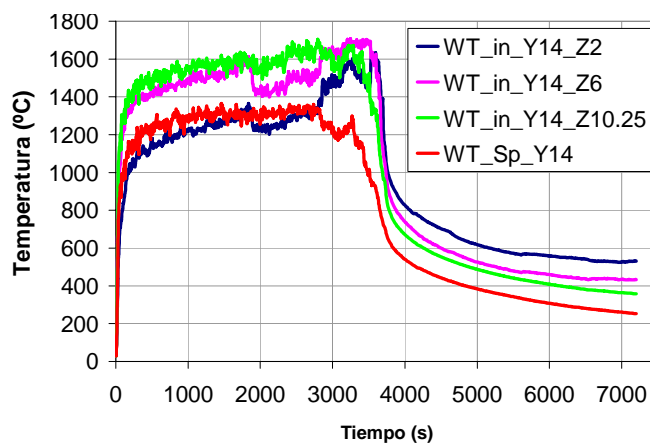
### 6.5.4.1. Temperatura superficial de la cara expuesta



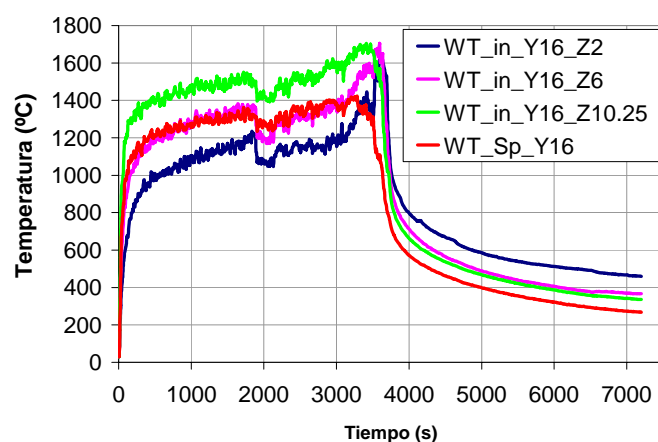
*Figura 6.5-11: Representación de la temperatura superficial del muro en la cara expuesta*



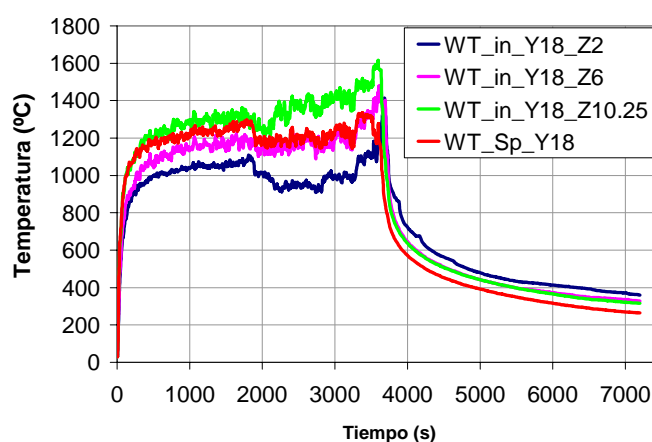
*Figura 6.5-12: Gráfica de las temperaturas para distintas alturas (Y=12 m)*



*Figura 6.5-13: Gráfica de las temperaturas para distintas alturas (Y=14 m)*



*Figura 6.5-14: Gráfica de las temperaturas para distintas alturas (Y=16 m)*



*Figura 6.5-15: Gráfica de las temperaturas para distintas alturas (Y=18 m)*

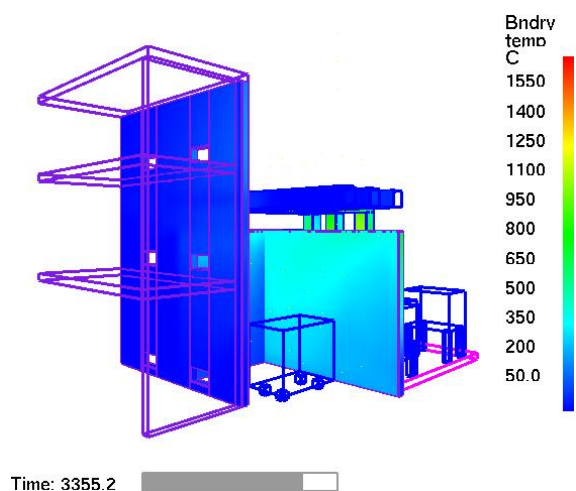
En la superficie no expuesta del muro las temperaturas máximas alcanzadas sobrepasan ligeramente los 500 °C, en la zona que se encuentra entre los 14 y 16 metros según el eje Y de coordenadas. Como se puede observar en las figuras siguientes, estas temperaturas superficiales se van incrementando lentamente ya que, principalmente, se producen debido a la conductividad a través del espesor del muro cortafuegos, tardando 3000 segundos (50 minutos) en llegar a su valor más alto. Posteriormente, una vez que la intensidad del fuego es notablemente menor, la temperatura va decreciendo aún más lentamente enfriándose hasta los 350 °C al final de la simulación.

Las temperaturas internas del muro son calculadas tomando como referencia la cara expuesta al fuego, a partir de la cual se han colocado puntos de medida con distintas profundidades. En la zona más cercana a la superficie hay una cantidad de puntos de medida mayor y a medida que se profundiza en el muro los puntos están más espaciados.

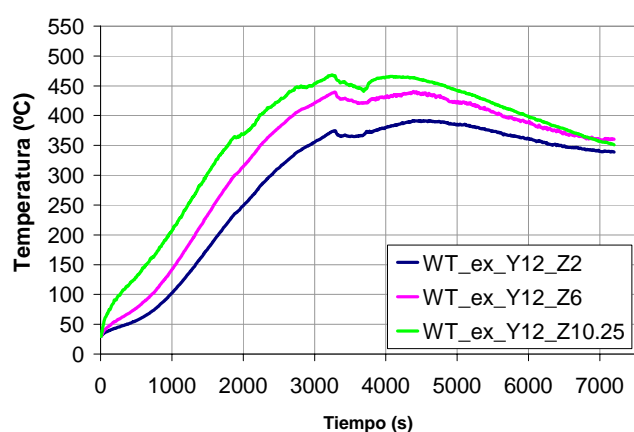
Se puede ver cómo las temperaturas van disminuyendo cuanto mayor es la profundidad como era de esperar, sin embargo, al sobrepasar los 70 mm de profundidad los resultados obtenidos están agrupados en una misma línea por motivos que se desconocen.

El punto con profundidad de 500 mm, es decir, en la superficie no expuesta, la temperatura calculada por el código es unos 100°C mayor de la obtenida al medir directamente en la superficie no expuesta. La conclusión de esta diferencia es que la temperatura alcanzada en la superficie no expuesta del muro no depende únicamente de la conductividad y que existe una transferencia de calor al ambiente desde la pared.

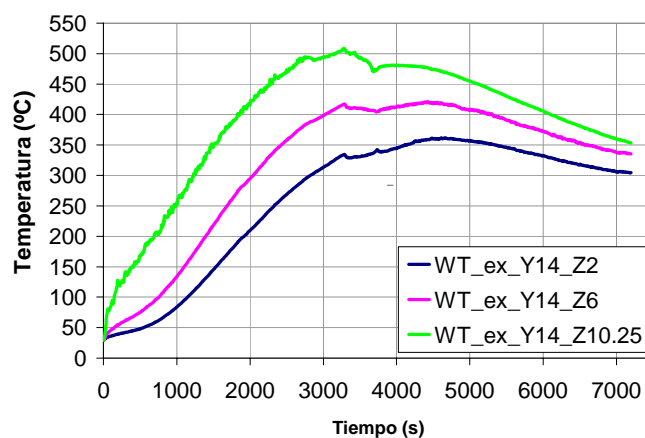
### 6.5.4.2. Temperatura superficial de la cara no expuesta



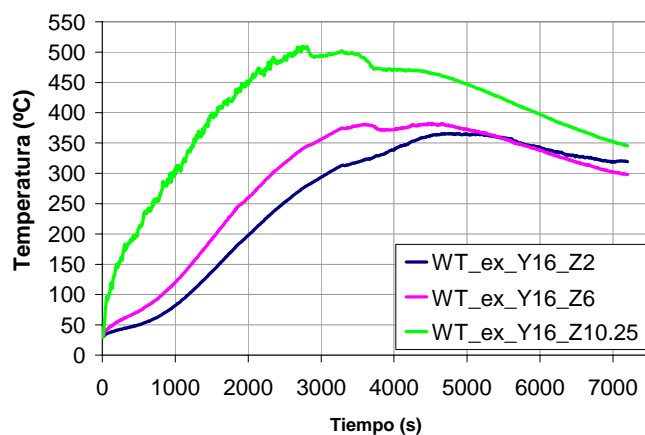
**Figura 6.5-16:** Representación de la temperatura superficial del muro en la cara NO expuesta



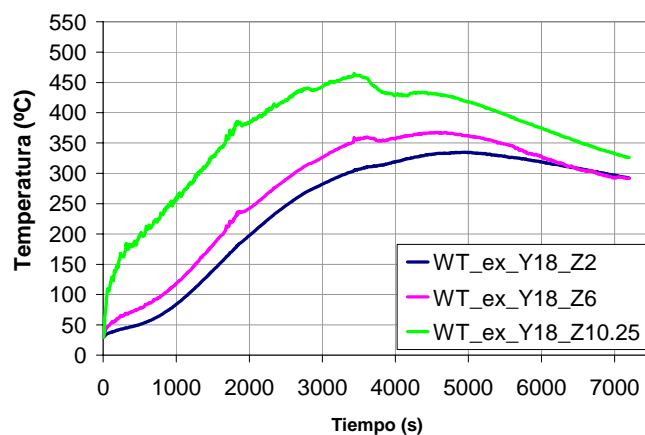
**Figura 6.5-17:** Gráfica de las temperaturas para distintas alturas (Y=12 m)



**Figura 6.5-18:** Gráfica de las temperaturas para distintas alturas (Y=14 m)



**Figura 6.5-19:** Gráfica de las temperaturas para distintas alturas (Y=16 m)



**Figura 6.5-20:** Gráfica de las temperaturas para distintas alturas (Y=18 m)

### 6.5.4.3. Temperaturas internas del muro cortafuegos

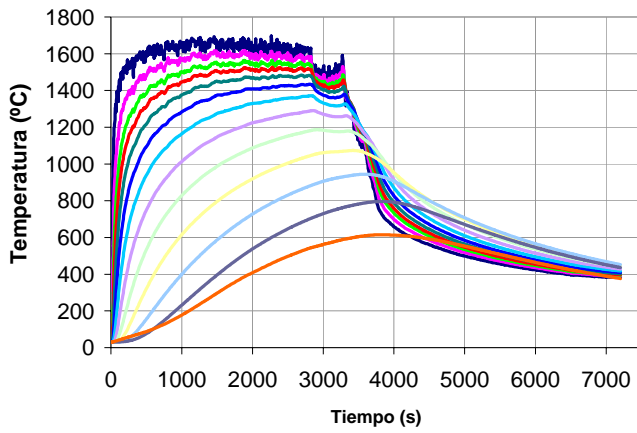


Figura 6.5-21: Temperaturas internas del muro (Y=12 m)

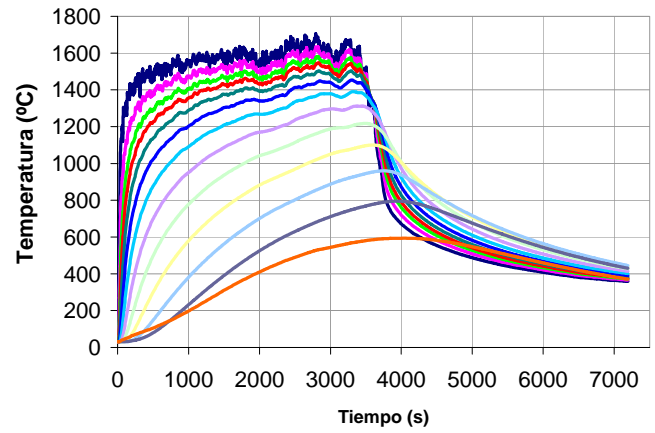


Figura 6.5-22: Temperaturas internas del muro (Y=14 m)

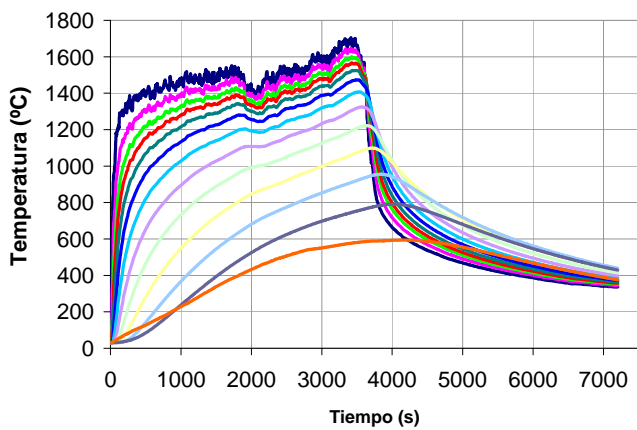
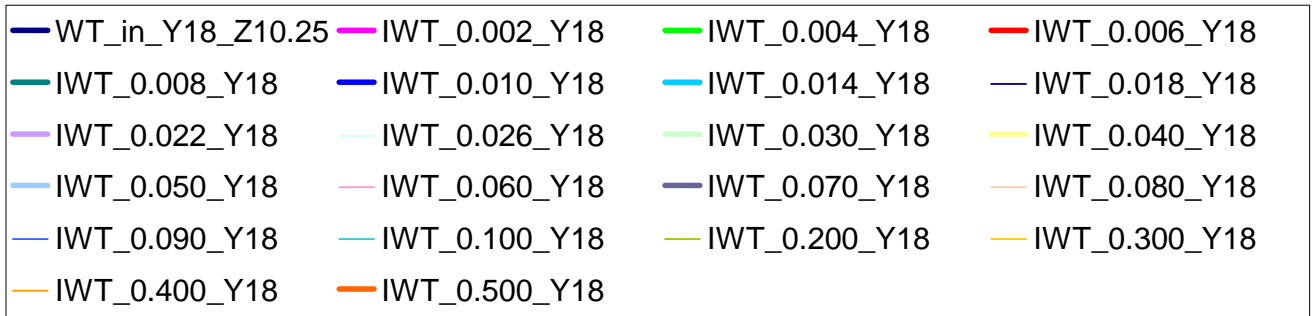


Figura 6.5-23: Temperaturas internas del muro (Y=16 m)

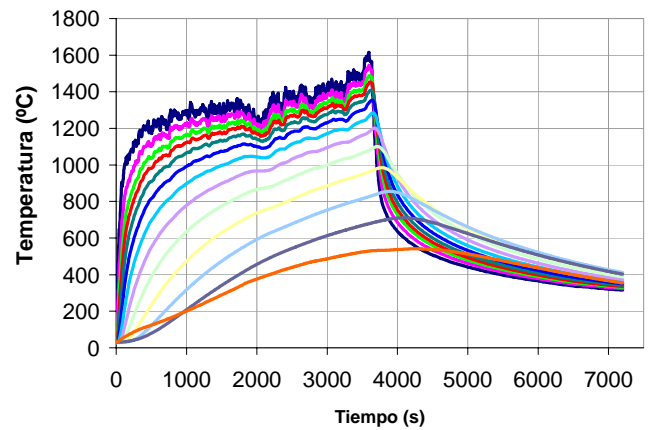
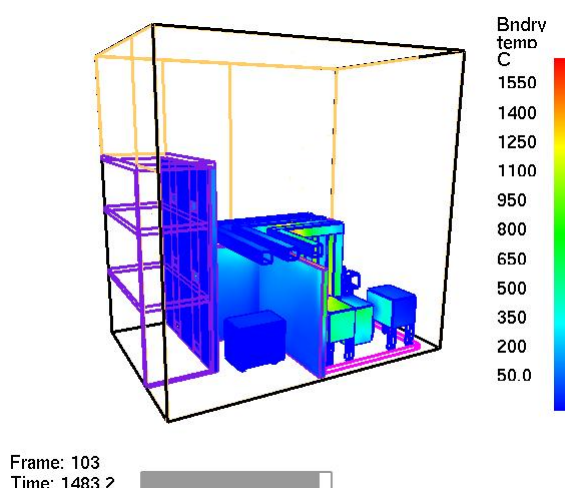


Figura 6.5-24: Temperaturas internas del muro (Y=18 m)

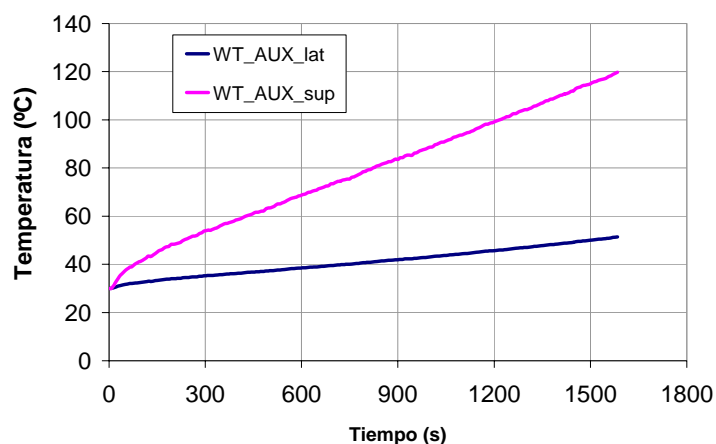
### 6.5.5. Temperatura superficial del transformador auxiliar

En numerosas instalaciones industriales, cuando ocurre un accidente en una zona es necesario diseñarlas de forma que se pueda garantizar la continuidad de funcionamiento del resto de componentes. Por este motivo se miden las temperaturas alcanzadas por el transformador auxiliar y si éstas son suficientemente altas como para impedir su correcto funcionamiento.

En este caso se colocaron dos puntos de medida, uno en la superficie superior del transformador y otro en el lateral más próximo al muro cortafuegos. Obteniéndose resultados diferentes, ya que la cara superior se calienta más que la otra, por lo que la transferencia de calor de mayor importancia no se produce a través del muro cortafuegos sino por encima de él. Con ello se demuestra la capacidad aislante del muro.



**Figura 6.5-25:** Representación de la temperatura en el transformador auxiliar



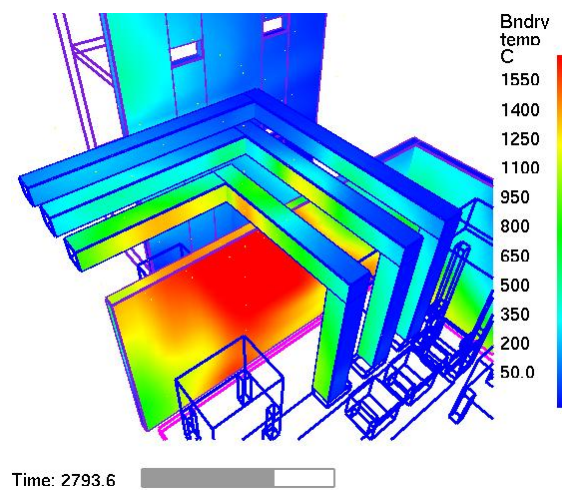
**Figura 6.5-26:** Temperaturas superficiales del transformador auxiliar



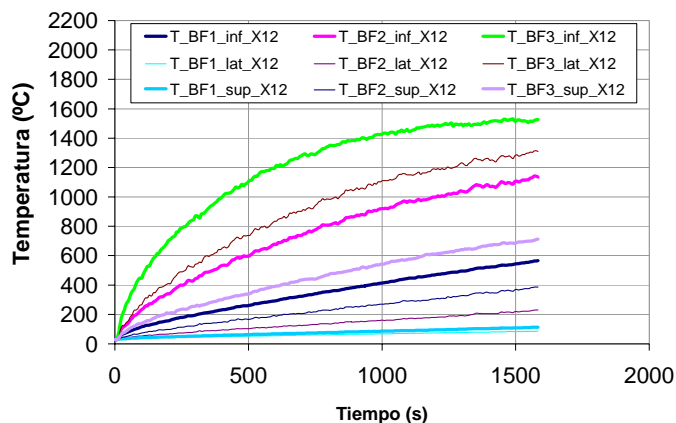
### 6.5.6. Temperatura superficial de las barras de fase aisladas

El transformador se conecta a una subestación de 220 kV mediante las barras de fase aisladas, las cuales han sido numeradas para que la identificación de los puntos de medida sea más sencilla. La barra de fase 1 es la que más cerca se encuentra del origen de coordenadas y la 3 la más lejana.

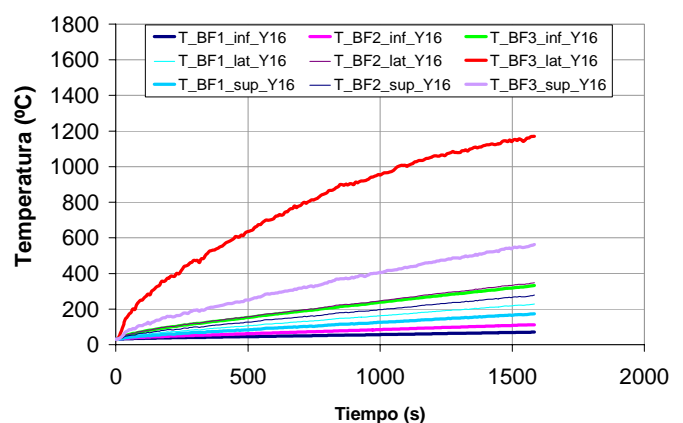
Se han colocado puntos de medida en la cara inferior, lateral y superior. Según los resultados obtenidos de la simulación. Es en la cara inferior de la barra de fase 3, en el punto X=14 m, donde se alcanza la máxima temperatura, llegando a sobrepasar los 1500 °C.



*Figura 6.5-27: Representación de las temperaturas superficiales de las barras de fase aisladas*



*Figura 6.5-28: Temperaturas superficiales (X=14 m)*



*Figura 6.5-29: Temperaturas superficiales (Y=16 m)*

### 6.5.7. Concentraciones de O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> y CO en el edificio eléctrico

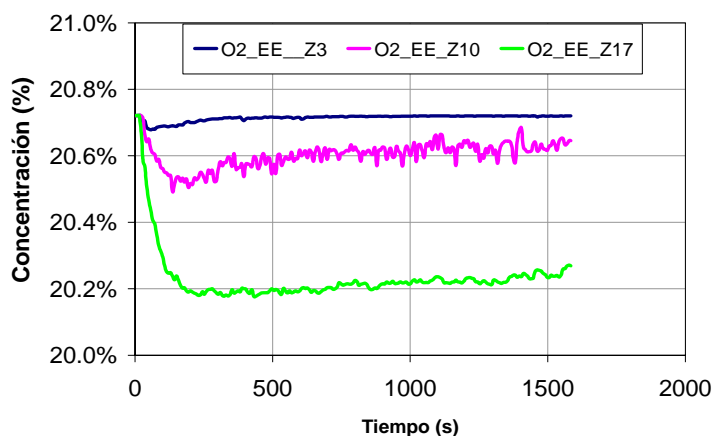
El Oxígeno es uno de los elementos indispensables para la combustión y se encuentra presente en el aire en una concentración del 20,7%. Si su mezcla es demasiado rica o demasiado pobre, el Oxígeno no podrá oxidar todos los enlaces de Hidrocarburos y será expulsado con el resto de los gases de escape. En este caso, la simulación está realizada en una zona al aire libre bien ventilada por lo que no habrá escasez de oxígeno para una correcta combustión.

El Dióxido de Carbono se produce por la combustión completa del Carbono, es decir, cuanto mayor es su concentración, mejor es la combustión.

El Monóxido de Carbono, en concentraciones altas y tiempos largos de exposición puede provocar en la sangre la transformación irreversible de la Hemoglobina, molécula encargada de transportar el oxígeno desde los pulmones a las células del organismo, en Carboxihemoglobina, incapaz de cumplir esa función. Por eso, concentraciones superiores de CO al 0,3 % en volumen resultan mortales.

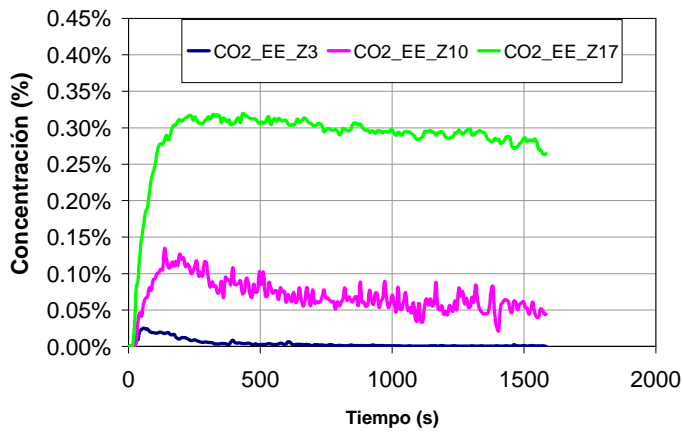
La falta de oxígeno en la combustión hace que ésta no se produzca completamente y se forme Monóxido de Carbono en lugar de Dióxido de Carbono. La aparición de mayores concentraciones de CO indican la existencia de una mezcla inicial rica o falta de oxígeno.

Los bienes también son afectados por los humos y los gases, a veces un material almacenado a distancias del foco del incendio pero afectado por los humos y gases se dañan irreversiblemente.

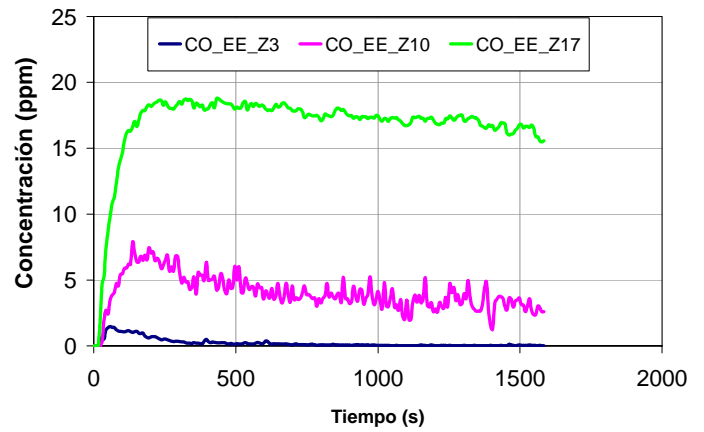


**Figura 6.5-30:** Concentración de O<sub>2</sub> en el edificio eléctrico

Las mayores variaciones de concentración, tanto de O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> y CO, en el edificio eléctrico se producen en la tercera planta (Z17) ya que debido a la localización y dimensiones del muro cortafuegos y a la existencia de aperturas de ventilación en la fachada es la planta en la que más cantidad de gases entran.



**Figura 6.5-31:** Concentración de CO<sub>2</sub> en el edificio eléctrico

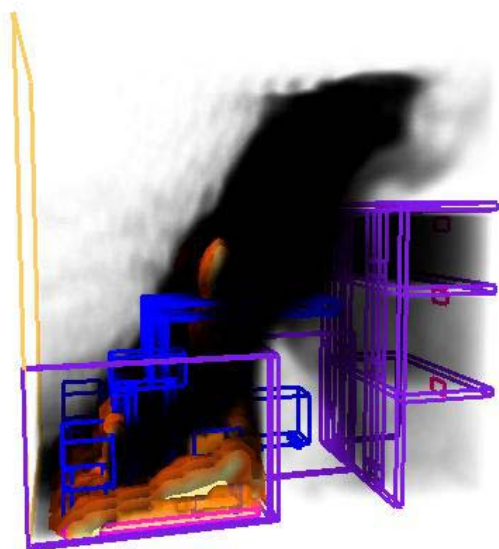


**Figura 6.5-32:** Concentración de CO en el edificio eléctrico

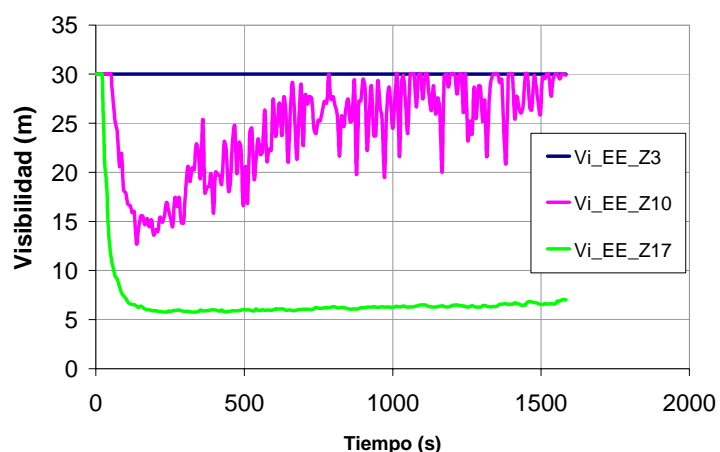
### 6.5.8. Visibilidad en el edificio eléctrico

El humo y los gases tóxicos provenientes de los *fuegos no térmicos* limita la visibilidad e irrita los ojos, creando una atmósfera de incertidumbre y dificultad para identificar las vías de escape o valerse de ellas, además de favorecer al miedo, a las manifestaciones de pánico y a los choques emocionales.

Como era de esperar, según lo visto en el apartado anterior, la visibilidad se reduce notablemente en la tercera planta, donde llega a alcanzar el valor mínimo de 5,75 metros, mientras que en la segunda planta el valor más bajo de la visibilidad corresponde a 12,71 metros. En la planta 1, sin embargo, la visibilidad no se ve alterada a pesar de que en la representación de Smokeview se puede apreciar una pequeña cantidad de humos.



**Figura 6.5-33:** Representación del humo generado en el incendio del transformador



**Figura 6.5-33:** Visibilidad en el edificio eléctrico

## 7. TRABAJOS FUTUROS Y RECOMENDACIONES

El alcance de este proyecto está limitado por su propia duración, por las hipótesis postuladas en sus distintos escenarios y por restricciones técnicas como las herramientas utilizadas.

Por tanto se recomienda para un posible trabajo futuro basado en este Proyecto Fin de Carrera:

- Realizar simulaciones en los que intervengan los sistemas de extinción de incendios, como los rociadores de agua pulverizada o espumas. Analizar los resultados y obtener los parámetros óptimos (localización, caudales, tiempos de actuación, etc.) para sofocar el fuego o en caso contrario minimizar los daños que pueda ocasionar el incendio.
- Analizar el comportamiento del incendio variando distintos parámetros de entrada. Pueden ser, por ejemplo, las condiciones ambientales (Velocidad del viento, Temperatura, etc.)
- FDS permite realizar las simulaciones con varios ordenadores en paralelo. Esto ayudaría a aumentar la capacidad computacional para definir un mallado mas fino del escenario.
- Hay infinidad de posibles escenarios con riesgo de producción de incendios, no sólo en el campo de la generación eléctrica, y cada uno de ellos presenta unas condiciones que lo hacen único. El presente proyecto trata de fomentar la utilización de este tipo de códigos para el análisis de cualquier posible escenario.
- Uso de nuevas versiones de FDS y Smokeview. Así como investigación de la validez, sensibilidad e incertidumbre de éstos.



**REFERENCIAS**

- McGrattan, K. (2004). "Fire Dynamics Simulator (Version 4) Technical Reference Guide." *NIST Special Publication 1018*, National Institute of Standards and Technology (NIST).
- McGrattan, K., and Forney, G. (2004). "Fire Dynamics Simulator (Version 4) User Guide." *NIST Special Publication 1019*, National Institute of Standards and Technology (NIST).
- NFPA 805.- "Performance-Based Standard for Fire Protection for Light Water Reactor Electric Generating Plants"
- NUREG 1805-. "Fire Dynamics Tools (FDTs) Quantitative Fire Hazard Analysis Methods for the U.S. Nuclear Regulatory Commission Fire Protection Inspection Program".
- NUREG 1824-. "Verification and Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications".
- The SFPE. Handbook of Fire Protection Engineering. Third Edition. SFPE. NFPA. Biblioteca de Empresarios Agrupados.
- NFPA 850: "Recommended Practice for Fire Protection for Electric Generating Plants And High Voltage Direct Current Converter Stations"
- ASTM E1355, "Standard Guide for Evaluating the Predictive Capability of Deterministic Fire Models"
- ASTM E1472, "Standard Guide for Documenting Computer Software for Fire Models"
- ASTM E1591, "Standard Guide for Obtaining Data for Deterministic Fire Models"
- Web del NIST (National Institute of Standards and Technology) - [www.bfrl.nist.gov/](http://www.bfrl.nist.gov/)
- Web de Fire Science and Technology - [www.doctorfire.com/FSTI.html](http://www.doctorfire.com/FSTI.html)





## ANEXO I - Fichero de entrada de FDS

Modelización en FDS del transformador principal de una planta de generación eléctrica.

Autor: Miguel Ángel de Lucas Hernández

\*\*\*\*\*

&HEAD CHID='TRANSFORMADOR', TITLE='TRANSFORMADOR Y EDIFICIO ELÉCTRICO'//

&TIME TWFIN= 5400/ (segundos)

\*\*\*\*\* MALLADO y DIMENSIONES DEL DOMINIO \*\*\*\*\*

&GRID IBAR= 60, JBAR= 40, KBAR=60 / Tamaño de celda = 0.5 m

&PDIM XBAR= 30, YBAR= 20, ZBAR=30 /

&MISC SURF\_DEFAULT = 'CONCRETE',  
 TMPA = 30,  
 TMPO = 30,  
 REACTION = 'TPH',  
 BNDF\_DEFAULT = .FALSE.  
 DTCORE = 100  
 DATABASE\_DIRECTORY= 'c:\nist\fds\database4\'

\*\*\*\*\* REACCIÓN \*\*\*\*\*

&REAC ID = 'TPH'  
 FYI = 'C\_12 H\_26, SFPE Handbook'  
 MW\_FUEL = 170.0  
 NU\_O2 = 18.5  
 NU\_CO2 = 12.0  
 NU\_H2O = 13.0  
 EPUMO2 = 13100.  
 CO\_YIELD = 0.011  
 SOOT\_YIELD = 0.041  
 RADIATIVE\_FRACTION= 0.35 /

\*\*\*\*\* SUPERFICIES \*\*\*\*\*

&SURF ID = 'TPH'  
 RGB = 1.0, 0.0, 1.0  
 DENSITY = 749.  
 C\_P = 2.4  
 KS = 0.1129  
 TMPIGN = 200.0  
 PHASE = 'LIQUID'  
 HEAT\_OF\_VAPORIZATION = 361.0  
 HEAT\_OF\_COMBUSTION = 42000.  
 BURN\_AWAY = .TRUE.  
 SURFACE\_DENSITY = 374.5 / SURFACE DENSITY = ESPESOR x DENSIDAD (0.5x749=374.5)

```

&SURF ID = 'CONCRETE'
      RGB = 0.5, 0.1, 0.9
      EMISSIVITY = 0.7
      C_P = 0.736
      DENSITY = 2430
      KS = 1.5
      BACKING = 'EXPOSED/'
&SURF ID = 'SHEET METAL'
      RGB = 0.6,0.6,0.6
      EMISSIVITY = 0.8
      C_P = 0.46
      DENSITY = 7850
      KS = 45.8
      SURFACE_DENSITY = 78.5 / SURFACE DENSITY = ESPESOR x DENSIDAD (0.01x7850=78.5)
&SURF ID = 'STEEL'
      RGB = 0.0,0.0,1.0
      EMISSIVITY = 0.8
      C_P = 0.46
      DENSITY = 7850
      KS = 45.8/
&SURF ID='EXHAUST' VEL= 3.88 RGB= 1.0, 0.0, 0.6 / Caudal volumétrico ( o VOLUME_FLUX)=3.89 m^3/s
&SURF ID='WIND' VEL= -10 PROFILE='ATMOSPHERIC', Z0= 5 PLE=0.15/

```

\*\*\*\*\* FUENTE INCENDIO Volumen x Densidad = 80892 KILOS de TPH \*\*\*\*\*

```

&OBST XB= 2.0, 14.0, 1.0, 19.0, 0.0, 0.5, SURF_ID='TPH' / Volumen=12x18x0.5
&OBST XB= 2.0, 14.0, 1.0, 1.0, 0.0, 1.0, SURF_ID='SHEET METAL' / Lateral 1
&OBST XB= 2.0, 14.0, 19.0, 19.0, 0.0, 1.0, SURF_ID='SHEET METAL' / Lateral 2
&OBST XB= 2.0, 2.0, 1.0, 19.0, 0.0, 1.0, SURF_ID='SHEET METAL' / Lateral 3
&OBST XB= 14.0, 14.0, 1.0, 19.0, 0.0, 1.0, SURF_ID='SHEET METAL' / Lateral 4

```

\*\*\*\*\* TRANSFORMADOR \*\*\*\*\*

```

&OBST XB= 2.0, 5.0, 2.0, 6.0, 2.5, 5.5, SURF_ID='STEEL'/ Radiador 1
&OBST XB= 2.0, 2.5, 2.0, 2.5, 0.0, 2.5, SURF_ID='STEEL'/ pata1
&OBST XB= 4.5, 5.0, 2.0, 2.5, 0.0, 2.5, SURF_ID='STEEL'/ pata2
&OBST XB= 2.0, 2.5, 5.5, 6.0, 0.0, 2.5, SURF_ID='STEEL'/ pata3
&OBST XB= 4.5, 5.0, 5.5, 6.0, 0.0, 2.5, SURF_ID='STEEL'/ pata4

&OBST XB= 10.0, 13.0, 2.0, 6.0, 2.5, 5.5, SURF_ID='STEEL'/ Radiador 2
&OBST XB= 10.0, 10.5, 2.0, 2.5, 0.0, 2.5, SURF_ID='STEEL'/ pata1
&OBST XB= 12.5, 13.0, 2.0, 2.5, 0.0, 2.5, SURF_ID='STEEL'/ pata2
&OBST XB= 10.0, 10.5, 5.5, 6.0, 0.0, 2.5, SURF_ID='STEEL'/ pata3
&OBST XB= 12.5, 13.0, 5.5, 6.0, 0.0, 2.5, SURF_ID='STEEL'/ pata4

&OBST XB= 2.0, 5.0, 14.0, 18.0, 2.5, 5.5, SURF_ID='STEEL'/ Radiador 3
&OBST XB= 2.0, 2.5, 14.0, 14.5, 0.0, 2.5, SURF_ID='STEEL'/ pata1
&OBST XB= 4.5, 5.0, 14.0, 14.5, 0.0, 2.5, SURF_ID='STEEL'/ pata2
&OBST XB= 2.0, 2.5, 17.5, 18.0, 0.0, 2.5, SURF_ID='STEEL'/ pata3

```

&OBST XB= 4.5, 5.0, 17.5, 18.0, 0.0, 2.5,	SURF_ID='STEEL'/ pata4
&OBST XB= 10.0, 13.0, 14.0, 18.0, 2.5, 5.5,	SURF_ID='STEEL'/ Radiador 4
&OBST XB= 10.0, 10.5, 14.0, 14.5, 0.0, 2.5,	SURF_ID='STEEL'/ pata1
&OBST XB= 12.5, 13.0, 14.0, 14.5, 0.0, 2.5,	SURF_ID='STEEL'/ pata2
&OBST XB= 10.0, 10.5, 17.5, 18.0, 0.0, 2.5,	SURF_ID='STEEL'/ pata3
&OBST XB= 12.5, 13.0, 17.5, 18.0, 0.0, 2.5,	SURF_ID='STEEL'/ pata4
&OBST XB= 6.0, 9.0, 4.5, 16.0, 0.5, 4.5,	SURF_ID='STEEL'/ Transformador
&OBST XB= 6.0, 6.5, 5.0, 5.5, 0.0, 0.5,	SURF_ID='STEEL'/ pata1
&OBST XB= 8.5, 9.0, 5.0, 5.5, 0.0, 0.5,	SURF_ID='STEEL'/ pata2
&OBST XB= 6.0, 6.5, 7.0, 7.5, 0.0, 0.5,	SURF_ID='STEEL'/ pata3
&OBST XB= 8.5, 9.0, 7.0, 7.5, 0.0, 0.5,	SURF_ID='STEEL'/ pata4
&OBST XB= 6.0, 6.5, 13.0, 13.5, 0.0, 0.5,	SURF_ID='STEEL'/ pata5
&OBST XB= 8.5, 9.0, 13.0, 13.5, 0.0, 0.5,	SURF_ID='STEEL'/ pata6
&OBST XB= 6.0, 6.5, 15.0, 15.5, 0.0, 0.5,	SURF_ID='STEEL'/ pata7
&OBST XB= 8.5, 9.0, 15.0, 15.5, 0.0, 0.5,	SURF_ID='STEEL'/ pata8
&OBST XB= 5.0, 9.5, 2.0, 4.0, 8.5, 10.5,	SURF_ID='STEEL'/ Depósito de expansión
&OBST XB= 6.0, 6.5, 3.0, 3.5, 1.0, 8.5,	SURF_ID='STEEL'/ pata1
&OBST XB= 8.5, 9.0, 3.0, 3.5, 1.0, 8.5,	SURF_ID='STEEL'/ pata2
&OBST XB= 6.0, 6.5, 3.0, 4.5, 1.0, 1.5,	SURF_ID='STEEL'/ pata3
&OBST XB= 8.5, 9.0, 3.0, 4.5, 1.0, 1.5,	SURF_ID='STEEL'/ pata4
&OBST XB= 6.0, 6.5, 3.0, 4.5, 3.5, 4.0,	SURF_ID='STEEL'/ pata5
&OBST XB= 8.5, 9.0, 3.0, 4.5, 3.5, 4.0,	SURF_ID='STEEL'/ pata6
&OBST XB= 8.0, 9.0, 6.5, 8.0, 4.5, 5.0,	SURF_ID='STEEL'/ Bornas
&OBST XB= 8.0, 9.0, 9.0, 10.5, 4.5, 5.0,	SURF_ID='STEEL'/
&OBST XB= 8.0, 9.0, 11.5, 13.0, 4.5, 5.0,	SURF_ID='STEEL'/
&OBST XB= 8.0, 9.0, 6.5, 7.5, 5.0, 12.0,	SURF_ID='STEEL' BNDF_BLOCK=.TRUE./ barras
&OBST XB= 8.0, 9.0, 9.0, 10.0, 5.0, 12.0,	SURF_ID='STEEL' BNDF_BLOCK=.TRUE./
&OBST XB= 8.0, 9.0, 12.0, 13.0, 5.0, 12.0,	SURF_ID='STEEL' BNDF_BLOCK=.TRUE./
&OBST XB= 8.0, 21.5, 6.5, 7.5, 12.0, 13.0,	SURF_ID='STEEL' BNDF_BLOCK=.TRUE./ barras
&OBST XB= 8.0, 19.0, 9.0, 10.0, 12.0, 13.0,	SURF_ID='STEEL' BNDF_BLOCK=.TRUE./
&OBST XB= 8.0, 16.5, 12.0, 13.0, 12.0, 13.0,	SURF_ID='STEEL' BNDF_BLOCK=.TRUE./
&OBST XB= 20.5, 21.5, 7.5, 20.0, 12.0, 13.0,	SURF_ID='STEEL' BNDF_BLOCK=.TRUE./ barras
&OBST XB= 18.0, 19.0, 10.0, 20.0, 12.0, 13.0,	SURF_ID='STEEL' BNDF_BLOCK=.TRUE./
&OBST XB= 15.5, 16.5, 13.0, 20.0, 12.0, 13.0,	SURF_ID='STEEL' BNDF_BLOCK=.TRUE./
&OBST XB= 6.0, 7.0, 7.0, 7.5, 4.5, 5.5,	SURF_ID='STEEL'/ Bornas
&OBST XB= 6.0, 7.0, 9.5, 10.0, 4.5, 5.5,	SURF_ID='STEEL'/
&OBST XB= 6.0, 7.0, 12.0, 12.5, 4.5, 5.5,	SURF_ID='STEEL'/
&OBST XB= 5.5, 7.0, 6.5, 8.0, 5.5, 7.0,	SURF_ID='STEEL'/ Bornas
&OBST XB= 5.5, 7.0, 9.0, 10.5, 5.5, 7.0,	SURF_ID='STEEL'/
&OBST XB= 5.5, 7.0, 11.5, 13.0, 5.5, 7.0,	SURF_ID='STEEL'/

## MODELIZACIÓN APLICADA A LA PROTECCIÓN CONTRA INCENDIOS

---

\*\*\*\*\* MURO \*\*\*\*\*

&OBST XB= 0.0, 14.5, 0.0, 0.5, 0.0, 10.5, SURF\_ID='CONCRETE' BPDF\_BLOCK=.TRUE./  
&OBST XB= 14.5, 15.0, 0.0, 19.5, 0.0, 10.5, SURF\_ID='CONCRETE' BPDF\_BLOCK=.TRUE./  
&OBST XB= 15.0, 23.0, 7.0, 7.5, 0.0, 10.5, SURF\_ID='CONCRETE' BPDF\_BLOCK=.TRUE./

\*\*\*\*\* TRAFIO AUXILIAR \*\*\*\*\*

&OBST XB= 16.5, 21.5, 12.5, 15.5, 0.5, 4.5, SURF\_ID='STEEL'/ Transformador Aux  
&OBST XB= 17.0, 17.5, 13.0, 13.5, 0.0, 0.5, SURF\_ID='STEEL'/ pata1  
&OBST XB= 20.5, 21.0, 13.0, 13.5, 0.0, 0.5, SURF\_ID='STEEL'/ pata2  
&OBST XB= 17.0, 17.5, 14.5, 15.0, 0.0, 0.5, SURF\_ID='STEEL'/ pata3  
&OBST XB= 20.5, 21.0, 14.5, 15.0, 0.0, 0.5, SURF\_ID='STEEL'/ pata4

\*\*\*\*\* EDIFICIO ELECTRICO \*\*\*\*\*

&OBST XB= 23.0, 23.5, 0.0, 14.0, 0.0, 19.5, SURF\_ID='CONCRETE' BPDF\_BLOCK=.TRUE./  
&OBST XB= 23.5, 30.0, 13.5, 14.0, 0.0, 19.5, SURF\_ID='CONCRETE'/  
&OBST XB= 23.0, 30.0, 0.0, 14.0, 19.5, 20.0, SURF\_ID='CONCRETE'/  
&HOLE XB= 22.5, 24.0 3.0, 5.0, 0.5, 1.5/  
&HOLE XB= 22.5, 24.0 3.0, 5.0, 8.0, 9.0/  
&HOLE XB= 22.5, 24.0 3.0, 5.0, 15.0, 16.0/  
  
&HOLE XB= 22.5, 24.0 9.0, 11.0, 0.5, 1.5/  
&HOLE XB= 22.5, 24.0 9.0, 11.0, 8.0, 9.0/  
&HOLE XB= 22.5, 24.0 9.0, 11.0, 15.0, 16.0/  
  
&OBST XB= 23.5, 30.0, 0.0, 13.5, 7.0, 7.5, SURF\_ID='CONCRETE'/ Entreplanta 1  
&OBST XB= 23.5, 30.0, 0.0, 13.5, 14.0, 14.5, SURF\_ID='CONCRETE'/ Entreplanta 2

\*\*\*\*\* VENTEOS \*\*\*\*\*

&VENT CB='XBAR0' SURF\_ID='WIND' OUTLINE=.TRUE./  
  
&VENT XB= 15.0, 23.0, 0.0, 0.0, 0.0, 30.0 SURF\_ID='OPEN' OUTLINE=.TRUE./  
&VENT XB= 00.0, 23.0, 0.0, 0.0, 10.5, 30.0 SURF\_ID='OPEN' OUTLINE=.TRUE./  
&VENT XB= 23.0, 30.0, 0.0, 0.0, 20.0, 30.0 SURF\_ID='OPEN' OUTLINE=.TRUE./  
  
&VENT XB= 30.0, 30.0, 14.0, 20.0, 0.0, 30.0 SURF\_ID='OPEN' OUTLINE=.TRUE./  
&VENT XB= 30.0, 30.0, 0.0, 20.0, 20.0, 30.0 SURF\_ID='OPEN' OUTLINE=.TRUE./  
  
&VENT CB='YBAR'  
&VENT CB='ZBAR' SURF\_ID='OPEN' OUTLINE=.TRUE./  
  
&VENT XB= 30.0, 30.0, 6.0, 8.0, 5.5, 6.5, SURF\_ID='EXHAUST' T\_OPEN=0.0 OUTLINE=.TRUE./  
&VENT XB= 30.0, 30.0, 6.0, 8.0, 12.5, 13.5, SURF\_ID='EXHAUST' T\_OPEN=0.0 OUTLINE=.TRUE./  
&VENT XB= 30.0, 30.0, 6.0, 8.0, 18.0, 19.0, SURF\_ID='EXHAUST' T\_OPEN=0.0 OUTLINE=.TRUE./

\*\*\*\*\* VISUALIZACION EN SMOKEVIEW \*\*\*\*\*

&SLCF PBX= 10.0,	QUANTITY='TEMPERATURE',	VECTOR=.TRUE. /
&SLCF XB= 15.0, 23.0, 4.0, 4.0, 0.0, 10.0,	QUANTITY='TEMPERATURE',	VECTOR=.TRUE. /
&SLCF XB= 15.0, 23.0, 15.0, 15.0, 0.0, 10.0,	QUANTITY='TEMPERATURE',	VECTOR=.TRUE. /
&SLCF XB= 23.5, 30.0, 4.5, 4.5, 0.0, 7.0,	QUANTITY='TEMPERATURE',	VECTOR=.TRUE. /
&SLCF XB= 23.5, 30.0, 5.0, 5.0, 7.5, 14.0,	QUANTITY='TEMPERATURE',	VECTOR=.TRUE. /
&SLCF XB= 23.5, 30.0, 5.5, 5.5, 14.5, 19.5,	QUANTITY='TEMPERATURE',	VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBX= 14.0,	QUANTITY='TEMPERATURE',	VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBX= 15.0,	QUANTITY='TEMPERATURE',	VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBX= 22.0,	QUANTITY='TEMPERATURE',	VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBZ= 5.0,	QUANTITY='TEMPERATURE',	VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBZ= 12.0,	QUANTITY='TEMPERATURE',	VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBZ= 25.0,	QUANTITY='TEMPERATURE',	VECTOR=.TRUE. /
&SLCF XB= 15.0, 30.0, 3.0, 3.0, 0.0, 3.0,	QUANTITY='VELOCITY',	VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBX= 15.0,	QUANTITY='VELOCITY',	VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBX= 10.0,	QUANTITY='VELOCITY',	VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBZ= 10.5,	QUANTITY='VELOCITY',	VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBZ= 20.0,	QUANTITY='VELOCITY',	VECTOR=.TRUE. /
&SLCF XB= 15.0, 23.0, 5.0, 5.0, 0.0, 10.0,	QUANTITY='VELOCITY',	VECTOR=.TRUE. /
&SLCF XB= 15.0, 23.0, 15.0, 15.0, 0.0, 10.0,	QUANTITY='VELOCITY',	VECTOR=.TRUE. /
&SLCF XB= 15.0, 30.0, 3.0, 3.0, 0.0, 3.0,	QUANTITY='VELOCITY',	VECTOR=.TRUE. /
&SLCF XB= 23.5, 30.0, 3.5, 3.5, 0.0, 7.0,	QUANTITY='VELOCITY',	VECTOR=.TRUE. /
&SLCF XB= 23.5, 30.0, 4.0, 4.0, 7.5, 14.0,	QUANTITY='VELOCITY',	VECTOR=.TRUE. /
&SLCF XB= 23.5, 30.0, 4.5, 4.5, 14.5, 19.5,	QUANTITY='VELOCITY',	VECTOR=.TRUE. /
&SLCF XB= 15.0, 30.0, 9.0, 9.0, 0.0, 3.0,	QUANTITY='VELOCITY',	VECTOR=.TRUE. /
&SLCF XB= 23.5, 30.0, 9.5, 9.5, 0.0, 7.0,	QUANTITY='VELOCITY',	VECTOR=.TRUE. /
&SLCF XB= 23.5, 30.0, 10.0, 10.0, 7.5, 14.0,	QUANTITY='VELOCITY',	VECTOR=.TRUE. /
&SLCF XB= 23.5, 30.0, 10.5, 10.5, 14.5, 19.5,	QUANTITY='VELOCITY',	VECTOR=.TRUE. /
&BNDF QUANTITY='BURNING_RATE'	/	
&BNDF QUANTITY='GAUGE_HEAT_FLUX'	/	
&BNDF QUANTITY='WALL_TEMPERATURE'	/	

## MODELIZACIÓN APLICADA A LA PROTECCIÓN CONTRA INCENDIOS

\*\*\*\*\* PUNTOS DE MEDIDA \*\*\*\*\*

\*\*\*\*\* TEMPERATURAS SUPERFICIALES DEL MURO \*\*\*\*\*

&THCP XYZ= 14.5, 12.0, 2.0,	QUANTITY='WALL_TEMPERATURE'	LABEL='WT_in_Y12_Z2'	IOR=-1 / 1
&THCP XYZ= 14.5, 12.0, 6.0,	QUANTITY='WALL_TEMPERATURE'	LABEL='WT_in_Y12_Z6'	IOR=-1 /
&THCP XYZ= 14.5, 12.0, 10.25,	QUANTITY='WALL_TEMPERATURE'	LABEL='WT_in_Y12_Z10.25'	IOR=-1 /
&THCP XYZ= 14.6, 12.0, 10.5,	QUANTITY='WALL_TEMPERATURE'	LABEL='WT_Sp_Y12'	IOR=3 /
&THCP XYZ= 14.7, 12.0, 10.5,	QUANTITY='WALL_TEMPERATURE'	LABEL='WT_Sp_Y12'	IOR=3 /
&THCP XYZ= 14.8, 12.0, 10.5,	QUANTITY='WALL_TEMPERATURE'	LABEL='WT_Sp_Y12'	IOR=3 /
&THCP XYZ= 15.0, 12.0, 2.0,	QUANTITY='WALL_TEMPERATURE'	LABEL='WT_ex_Y12_Z2'	IOR=1 /
&THCP XYZ= 15.0, 12.0, 6.0,	QUANTITY='WALL_TEMPERATURE'	LABEL='WT_ex_Y12_Z6'	IOR=1 /
&THCP XYZ= 15.0, 12.0, 10.25,	QUANTITY='WALL_TEMPERATURE'	LABEL='WT_ex_Y12_Z10.25'	IOR=1 /
&THCP XYZ= 14.5, 12.0, 10.25,	QUANTITY='INSIDE_WALL_TEMPERATURE'	DEPTH= 0.002 LABEL='IWT_0.002_Y12'	IOR=-1 /
&THCP XYZ= 14.5, 12.0, 10.25,	QUANTITY='INSIDE_WALL_TEMPERATURE'	DEPTH= 0.004 LABEL='IWT_0.004_Y12'	IOR=-1 /
&THCP XYZ= 14.5, 12.0, 10.25,	QUANTITY='INSIDE_WALL_TEMPERATURE'	DEPTH= 0.006 LABEL='IWT_0.006_Y12'	IOR=-1 /
&THCP XYZ= 14.5, 12.0, 10.25,	QUANTITY='INSIDE_WALL_TEMPERATURE'	DEPTH= 0.008 LABEL='IWT_0.008_Y12'	IOR=-1 /
&THCP XYZ= 14.5, 12.0, 10.25,	QUANTITY='INSIDE_WALL_TEMPERATURE'	DEPTH= 0.010 LABEL='IWT_0.010_Y12'	IOR=-1 /
&THCP XYZ= 14.5, 12.0, 10.25,	QUANTITY='INSIDE_WALL_TEMPERATURE'	DEPTH= 0.014 LABEL='IWT_0.014_Y12'	IOR=-1 /
&THCP XYZ= 14.5, 12.0, 10.25,	QUANTITY='INSIDE_WALL_TEMPERATURE'	DEPTH= 0.018 LABEL='IWT_0.018_Y12'	IOR=-1 /
&THCP XYZ= 14.5, 12.0, 10.25,	QUANTITY='INSIDE_WALL_TEMPERATURE'	DEPTH= 0.022 LABEL='IWT_0.022_Y12'	IOR=-1 /
&THCP XYZ= 14.5, 12.0, 10.25,	QUANTITY='INSIDE_WALL_TEMPERATURE'	DEPTH= 0.026 LABEL='IWT_0.026_Y12'	IOR=-1 /
&THCP XYZ= 14.5, 12.0, 10.25,	QUANTITY='INSIDE_WALL_TEMPERATURE'	DEPTH= 0.030 LABEL='IWT_0.030_Y12'	IOR=-1 /
&THCP XYZ= 14.5, 12.0, 10.25,	QUANTITY='INSIDE_WALL_TEMPERATURE'	DEPTH= 0.040 LABEL='IWT_0.040_Y12'	IOR=-1 /
&THCP XYZ= 14.5, 12.0, 10.25,	QUANTITY='INSIDE_WALL_TEMPERATURE'	DEPTH= 0.050 LABEL='IWT_0.050_Y12'	IOR=-1 /
&THCP XYZ= 14.5, 12.0, 10.25,	QUANTITY='INSIDE_WALL_TEMPERATURE'	DEPTH= 0.060 LABEL='IWT_0.060_Y12'	IOR=-1 /
&THCP XYZ= 14.5, 12.0, 10.25,	QUANTITY='INSIDE_WALL_TEMPERATURE'	DEPTH= 0.070 LABEL='IWT_0.070_Y12'	IOR=-1 /
&THCP XYZ= 14.5, 12.0, 10.25,	QUANTITY='INSIDE_WALL_TEMPERATURE'	DEPTH= 0.080 LABEL='IWT_0.080_Y12'	IOR=-1 /
&THCP XYZ= 14.5, 12.0, 10.25,	QUANTITY='INSIDE_WALL_TEMPERATURE'	DEPTH= 0.090 LABEL='IWT_0.090_Y12'	IOR=-1 /
&THCP XYZ= 14.5, 12.0, 10.25,	QUANTITY='INSIDE_WALL_TEMPERATURE'	DEPTH= 0.100 LABEL='IWT_0.100_Y12'	IOR=-1 /
&THCP XYZ= 14.5, 12.0, 10.25,	QUANTITY='INSIDE_WALL_TEMPERATURE'	DEPTH= 0.200 LABEL='IWT_0.200_Y12'	IOR=-1 /
&THCP XYZ= 14.5, 12.0, 10.25,	QUANTITY='INSIDE_WALL_TEMPERATURE'	DEPTH= 0.300 LABEL='IWT_0.300_Y12'	IOR=-1 /
&THCP XYZ= 14.5, 12.0, 10.25,	QUANTITY='INSIDE_WALL_TEMPERATURE'	DEPTH= 0.400 LABEL='IWT_0.400_Y12'	IOR=-1 /
&THCP XYZ= 14.5, 12.0, 10.25,	QUANTITY='INSIDE_WALL_TEMPERATURE'	DEPTH= 0.500 LABEL='IWT_0.500_Y12'	IOR=-1 /
&THCP XYZ= 14.5, 14.0, 2.0,	QUANTITY='WALL_TEMPERATURE'	LABEL='WT_in_Y14_Z2'	IOR=-1 / 31
&THCP XYZ= 14.5, 14.0, 6.0,	QUANTITY='WALL_TEMPERATURE'	LABEL='WT_in_Y14_Z6'	IOR=-1 /
&THCP XYZ= 14.5, 14.0, 10.25,	QUANTITY='WALL_TEMPERATURE'	LABEL='WT_in_Y14_Z10.25'	IOR=-1 /
&THCP XYZ= 14.6, 14.0, 10.5,	QUANTITY='WALL_TEMPERATURE'	LABEL='WT_Sp_Y14'	IOR=3 /
&THCP XYZ= 14.7, 14.0, 10.5,	QUANTITY='WALL_TEMPERATURE'	LABEL='WT_Sp_Y14'	IOR=3 /
&THCP XYZ= 14.8, 14.0, 10.5,	QUANTITY='WALL_TEMPERATURE'	LABEL='WT_Sp_Y14'	IOR=3 /
&THCP XYZ= 15.0, 14.0, 2.0,	QUANTITY='WALL_TEMPERATURE'	LABEL='WT_ex_Y14_Z2'	IOR=1 /
&THCP XYZ= 15.0, 14.0, 6.0,	QUANTITY='WALL_TEMPERATURE'	LABEL='WT_ex_Y14_Z6'	IOR=1 /
&THCP XYZ= 15.0, 14.0, 10.25,	QUANTITY='WALL_TEMPERATURE'	LABEL='WT_ex_Y14_Z10.25'	IOR=1 /

&THCP XYZ= 14.5, 16.0, 10.25,	QUANTITY='INSIDE_WALL_TEMPERATURE'	DEPTH= 0.002	LABEL='IWT_0.002_Y16'	IOR=-1 /
&THCP XYZ= 14.5, 16.0, 10.25,	QUANTITY='INSIDE_WALL_TEMPERATURE'	DEPTH= 0.004	LABEL='IWT_0.004_Y16'	IOR=-1 /
&THCP XYZ= 14.5, 16.0, 10.25,	QUANTITY='INSIDE_WALL_TEMPERATURE'	DEPTH= 0.006	LABEL='IWT_0.006_Y16'	IOR=-1 /
&THCP XYZ= 14.5, 16.0, 10.25,	QUANTITY='INSIDE_WALL_TEMPERATURE'	DEPTH= 0.008	LABEL='IWT_0.008_Y16'	IOR=-1 /
&THCP XYZ= 14.5, 16.0, 10.25,	QUANTITY='INSIDE_WALL_TEMPERATURE'	DEPTH= 0.010	LABEL='IWT_0.010_Y16'	IOR=-1 /
&THCP XYZ= 14.5, 16.0, 10.25,	QUANTITY='INSIDE_WALL_TEMPERATURE'	DEPTH= 0.014	LABEL='IWT_0.014_Y16'	IOR=-1 /
&THCP XYZ= 14.5, 16.0, 10.25,	QUANTITY='INSIDE_WALL_TEMPERATURE'	DEPTH= 0.018	LABEL='IWT_0.018_Y16'	IOR=-1 /
&THCP XYZ= 14.5, 16.0, 10.25,	QUANTITY='INSIDE_WALL_TEMPERATURE'	DEPTH= 0.022	LABEL='IWT_0.022_Y16'	IOR=-1 /
&THCP XYZ= 14.5, 16.0, 10.25,	QUANTITY='INSIDE_WALL_TEMPERATURE'	DEPTH= 0.026	LABEL='IWT_0.026_Y16'	IOR=-1 /
&THCP XYZ= 14.5, 16.0, 10.25,	QUANTITY='INSIDE_WALL_TEMPERATURE'	DEPTH= 0.030	LABEL='IWT_0.030_Y16'	IOR=-1 /
&THCP XYZ= 14.5, 16.0, 10.25,	QUANTITY='INSIDE_WALL_TEMPERATURE'	DEPTH= 0.040	LABEL='IWT_0.040_Y16'	IOR=-1 /
&THCP XYZ= 14.5, 16.0, 10.25,	QUANTITY='INSIDE_WALL_TEMPERATURE'	DEPTH= 0.050	LABEL='IWT_0.050_Y16'	IOR=-1 /
&THCP XYZ= 14.5, 16.0, 10.25,	QUANTITY='INSIDE_WALL_TEMPERATURE'	DEPTH= 0.060	LABEL='IWT_0.060_Y16'	IOR=-1 /
&THCP XYZ= 14.5, 16.0, 10.25,	QUANTITY='INSIDE_WALL_TEMPERATURE'	DEPTH= 0.070	LABEL='IWT_0.070_Y16'	IOR=-1 /
&THCP XYZ= 14.5, 16.0, 10.25,	QUANTITY='INSIDE_WALL_TEMPERATURE'	DEPTH= 0.080	LABEL='IWT_0.080_Y16'	IOR=-1 /

&THCP XYZ= 14.5, 16.0, 10.25,	QUANTITY='INSIDE_WALL_TEMPERATURE'	DEPTH= 0.090	LABEL='IWT_0.090_Y16'	IOR=-1 /
&THCP XYZ= 14.5, 16.0, 10.25,	QUANTITY='INSIDE_WALL_TEMPERATURE'	DEPTH= 0.100	LABEL='IWT_0.100_Y16'	IOR=-1 /
&THCP XYZ= 14.5, 16.0, 10.25,	QUANTITY='INSIDE_WALL_TEMPERATURE'	DEPTH= 0.200	LABEL='IWT_0.200_Y16'	IOR=-1 /
&THCP XYZ= 14.5, 16.0, 10.25,	QUANTITY='INSIDE_WALL_TEMPERATURE'	DEPTH= 0.300	LABEL='IWT_0.300_Y16'	IOR=-1 /
&THCP XYZ= 14.5, 16.0, 10.25,	QUANTITY='INSIDE_WALL_TEMPERATURE'	DEPTH= 0.400	LABEL='IWT_0.400_Y16'	IOR=-1 /
&THCP XYZ= 14.5, 16.0, 10.25,	QUANTITY='INSIDE_WALL_TEMPERATURE'	DEPTH= 0.500	LABEL='IWT_0.500_Y16'	IOR=-1 /
&THCP XYZ= 14.5, 18.0, 2.0,	QUANTITY='WALL_TEMPERATURE'	LABEL='WT_in_Y18_Z2'	IOR=-1 /	91
&THCP XYZ= 14.5, 18.0, 6.0,	QUANTITY='WALL_TEMPERATURE'	LABEL='WT_in_Y18_Z6'	IOR=-1 /	
&THCP XYZ= 14.5, 18.0, 10.25,	QUANTITY='WALL_TEMPERATURE'	LABEL='WT_in_Y18_Z10.25'	IOR=-1 /	
&THCP XYZ= 14.6, 18.0, 10.5,	QUANTITY='WALL_TEMPERATURE'	LABEL='WT_Sp_Y18'	IOR=3 /	
&THCP XYZ= 14.7, 18.0, 10.5,	QUANTITY='WALL_TEMPERATURE'	LABEL='WT_Sp_Y18'	IOR=3 /	
&THCP XYZ= 14.8, 18.0, 10.5,	QUANTITY='WALL_TEMPERATURE'	LABEL='WT_Sp_Y18'	IOR=3 /	
&THCP XYZ= 15.0, 18.0, 2.0,	QUANTITY='WALL_TEMPERATURE'	LABEL='WT_ex_Y18_Z2'	IOR=1 /	
&THCP XYZ= 15.0, 18.0, 6.0,	QUANTITY='WALL_TEMPERATURE'	LABEL='WT_ex_Y18_Z6'	IOR=1 /	
&THCP XYZ= 15.0, 18.0, 10.25,	QUANTITY='WALL_TEMPERATURE'	LABEL='WT_ex_Y18_Z10.25'	IOR=1 /	
&THCP XYZ= 14.5, 18.0, 10.25,	QUANTITY='INSIDE_WALL_TEMPERATURE'	DEPTH= 0.002	LABEL='IWT_0.002_Y18'	IOR=-1 /
&THCP XYZ= 14.5, 18.0, 10.25,	QUANTITY='INSIDE_WALL_TEMPERATURE'	DEPTH= 0.004	LABEL='IWT_0.004_Y18'	IOR=-1 /
&THCP XYZ= 14.5, 18.0, 10.25,	QUANTITY='INSIDE_WALL_TEMPERATURE'	DEPTH= 0.006	LABEL='IWT_0.006_Y18'	IOR=-1 /
&THCP XYZ= 14.5, 18.0, 10.25,	QUANTITY='INSIDE_WALL_TEMPERATURE'	DEPTH= 0.008	LABEL='IWT_0.008_Y18'	IOR=-1 /
&THCP XYZ= 14.5, 18.0, 10.25,	QUANTITY='INSIDE_WALL_TEMPERATURE'	DEPTH= 0.010	LABEL='IWT_0.010_Y18'	IOR=-1 /
&THCP XYZ= 14.5, 18.0, 10.25,	QUANTITY='INSIDE_WALL_TEMPERATURE'	DEPTH= 0.014	LABEL='IWT_0.014_Y18'	IOR=-1 /
&THCP XYZ= 14.5, 18.0, 10.25,	QUANTITY='INSIDE_WALL_TEMPERATURE'	DEPTH= 0.018	LABEL='IWT_0.018_Y18'	IOR=-1 /
&THCP XYZ= 14.5, 18.0, 10.25,	QUANTITY='INSIDE_WALL_TEMPERATURE'	DEPTH= 0.022	LABEL='IWT_0.022_Y18'	IOR=-1 /
&THCP XYZ= 14.5, 18.0, 10.25,	QUANTITY='INSIDE_WALL_TEMPERATURE'	DEPTH= 0.026	LABEL='IWT_0.026_Y18'	IOR=-1 /
&THCP XYZ= 14.5, 18.0, 10.25,	QUANTITY='INSIDE_WALL_TEMPERATURE'	DEPTH= 0.030	LABEL='IWT_0.030_Y18'	IOR=-1 /
&THCP XYZ= 14.5, 18.0, 10.25,	QUANTITY='INSIDE_WALL_TEMPERATURE'	DEPTH= 0.040	LABEL='IWT_0.040_Y18'	IOR=-1 /
&THCP XYZ= 14.5, 18.0, 10.25,	QUANTITY='INSIDE_WALL_TEMPERATURE'	DEPTH= 0.050	LABEL='IWT_0.050_Y18'	IOR=-1 /
&THCP XYZ= 14.5, 18.0, 10.25,	QUANTITY='INSIDE_WALL_TEMPERATURE'	DEPTH= 0.060	LABEL='IWT_0.060_Y18'	IOR=-1 /
&THCP XYZ= 14.5, 18.0, 10.25,	QUANTITY='INSIDE_WALL_TEMPERATURE'	DEPTH= 0.070	LABEL='IWT_0.070_Y18'	IOR=-1 /
&THCP XYZ= 14.5, 18.0, 10.25,	QUANTITY='INSIDE_WALL_TEMPERATURE'	DEPTH= 0.080	LABEL='IWT_0.080_Y18'	IOR=-1 /
&THCP XYZ= 14.5, 18.0, 10.25,	QUANTITY='INSIDE_WALL_TEMPERATURE'	DEPTH= 0.090	LABEL='IWT_0.090_Y18'	IOR=-1 /
&THCP XYZ= 14.5, 18.0, 10.25,	QUANTITY='INSIDE_WALL_TEMPERATURE'	DEPTH= 0.100	LABEL='IWT_0.100_Y18'	IOR=-1 /
&THCP XYZ= 14.5, 18.0, 10.25,	QUANTITY='INSIDE_WALL_TEMPERATURE'	DEPTH= 0.200	LABEL='IWT_0.200_Y18'	IOR=-1 /
&THCP XYZ= 14.5, 18.0, 10.25,	QUANTITY='INSIDE_WALL_TEMPERATURE'	DEPTH= 0.300	LABEL='IWT_0.300_Y18'	IOR=-1 /
&THCP XYZ= 14.5, 18.0, 10.25,	QUANTITY='INSIDE_WALL_TEMPERATURE'	DEPTH= 0.400	LABEL='IWT_0.400_Y18'	IOR=-1 /
&THCP XYZ= 14.5, 18.0, 10.25,	QUANTITY='INSIDE_WALL_TEMPERATURE'	DEPTH= 0.500	LABEL='IWT_0.500_Y18'	IOR=-1 /



\*\*\*\*\* TEMPERATURAS DE LOS GASES \*\*\*\*\*

&THCP XYZ= 17.0, 5.0, 2.0,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_ex_X17_Y5_Z2' /
&THCP XYZ= 19.0, 5.0, 2.0,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_ex_X19_Y5_Z2' /
&THCP XYZ= 21.0, 5.0, 2.0,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_ex_X21_Y5_Z2' /
&THCP XYZ= 17.0, 5.0, 5.0,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_ex_X17_Y5_Z5' /
&THCP XYZ= 19.0, 5.0, 5.0,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_ex_X19_Y5_Z5' /
&THCP XYZ= 21.0, 5.0, 5.0,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_ex_X21_Y5_Z5' /
&THCP XYZ= 17.0, 5.0, 8.0,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_ex_X17_Y5_Z8' /
&THCP XYZ= 19.0, 5.0, 8.0,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_ex_X19_Y5_Z8' /
&THCP XYZ= 21.0, 5.0, 8.0,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_ex_X21_Y5_Z8' /
&THCP XYZ= 17.0, 5.0, 12.0,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_ex_X17_Y5_Z12' /
&THCP XYZ= 19.0, 5.0, 12.0,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_ex_X19_Y5_Z12' /
&THCP XYZ= 21.0, 5.0, 12.0,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_ex_X21_Y5_Z12' /
&THCP XYZ= 17.0, 5.0, 15.0,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_ex_X17_Y5_Z15' /
&THCP XYZ= 19.0, 5.0, 15.0,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_ex_X19_Y5_Z15' /
&THCP XYZ= 21.0, 5.0, 15.0,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_ex_X21_Y5_Z15' /
&THCP XYZ= 17.0, 5.0, 18.0,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_ex_X17_Y5_Z18' /
&THCP XYZ= 19.0, 5.0, 18.0,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_ex_X19_Y5_Z18' /
&THCP XYZ= 21.0, 5.0, 18.0,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_ex_X21_Y5_Z18' /
&THCP XYZ= 17.0, 8.0, 2.0,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_ex_X17_Y8_Z2' /
&THCP XYZ= 19.0, 8.0, 2.0,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_ex_X19_Y8_Z2' /
&THCP XYZ= 21.0, 8.0, 2.0,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_ex_X21_Y8_Z2' /
&THCP XYZ= 17.0, 8.0, 5.0,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_ex_X17_Y8_Z5' /
&THCP XYZ= 19.0, 8.0, 5.0,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_ex_X19_Y8_Z5' /
&THCP XYZ= 21.0, 8.0, 5.0,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_ex_X21_Y8_Z5' /
&THCP XYZ= 17.0, 8.0, 8.0,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_ex_X17_Y8_Z8' /
&THCP XYZ= 19.0, 8.0, 8.0,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_ex_X19_Y8_Z8' /
&THCP XYZ= 21.0, 8.0, 8.0,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_ex_X21_Y8_Z8' /
&THCP XYZ= 17.0, 8.0, 12.0,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_ex_X17_Y8_Z12' /
&THCP XYZ= 19.0, 8.0, 12.0,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_ex_X19_Y8_Z12' /
&THCP XYZ= 21.0, 8.0, 12.0,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_ex_X21_Y8_Z12' /
&THCP XYZ= 17.0, 8.0, 15.0,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_ex_X17_Y8_Z15' /
&THCP XYZ= 19.0, 8.0, 15.0,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_ex_X19_Y8_Z15' /
&THCP XYZ= 21.0, 8.0, 15.0,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_ex_X21_Y8_Z15' /
&THCP XYZ= 17.0, 8.0, 18.0,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_ex_X17_Y8_Z18' /
&THCP XYZ= 19.0, 8.0, 18.0,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_ex_X19_Y8_Z18' /
&THCP XYZ= 21.0, 8.0, 18.0,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_ex_X21_Y8_Z18' /

&THCP XYZ= 17.0, 12.0, 2.0,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_ex_X17_Y12_Z2' /
&THCP XYZ= 19.0, 12.0, 2.0,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_ex_X19_Y12_Z2' /
&THCP XYZ= 21.0, 12.0, 2.0,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_ex_X21_Y12_Z2' /
&THCP XYZ= 17.0, 12.0, 5.0,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_ex_X17_Y12_Z5' /
&THCP XYZ= 19.0, 12.0, 5.0,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_ex_X19_Y12_Z5' /
&THCP XYZ= 21.0, 12.0, 5.0,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_ex_X21_Y12_Z5' /
&THCP XYZ= 17.0, 12.0, 8.0,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_ex_X17_Y12_Z8' /
&THCP XYZ= 19.0, 12.0, 8.0,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_ex_X19_Y12_Z8' /
&THCP XYZ= 21.0, 12.0, 8.0,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_ex_X21_Y12_Z8' /
&THCP XYZ= 17.0, 12.0, 12.0,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_ex_X17_Y12_Z12' /
&THCP XYZ= 19.0, 12.0, 12.0,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_ex_X19_Y12_Z12' /
&THCP XYZ= 21.0, 12.0, 12.0,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_ex_X21_Y12_Z12' /
&THCP XYZ= 17.0, 12.0, 15.0,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_ex_X17_Y12_Z15' /
&THCP XYZ= 19.0, 12.0, 15.0,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_ex_X19_Y12_Z15' /
&THCP XYZ= 21.0, 12.0, 15.0,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_ex_X21_Y12_Z15' /
&THCP XYZ= 17.0, 12.0, 18.0,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_ex_X17_Y12_Z18' /
&THCP XYZ= 19.0, 12.0, 18.0,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_ex_X19_Y12_Z18' /
&THCP XYZ= 21.0, 12.0, 18.0,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_ex_X21_Y12_Z18' /
&THCP XYZ= 17.0, 15.0, 2.0,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_ex_X17_Y15_Z2' /
&THCP XYZ= 19.0, 15.0, 2.0,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_ex_X19_Y15_Z2' /
&THCP XYZ= 21.0, 15.0, 2.0,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_ex_X21_Y15_Z2' /
&THCP XYZ= 17.0, 15.0, 5.0,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_ex_X17_Y15_Z5' /
&THCP XYZ= 19.0, 15.0, 5.0,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_ex_X19_Y15_Z5' /
&THCP XYZ= 21.0, 15.0, 5.0,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_ex_X21_Y15_Z5' /
&THCP XYZ= 17.0, 15.0, 8.0,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_ex_X17_Y15_Z8' /
&THCP XYZ= 19.0, 15.0, 8.0,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_ex_X19_Y15_Z8' /
&THCP XYZ= 21.0, 15.0, 8.0,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_ex_X21_Y15_Z8' /
&THCP XYZ= 17.0, 15.0, 12.0,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_ex_X17_Y15_Z12' /
&THCP XYZ= 19.0, 15.0, 12.0,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_ex_X19_Y15_Z12' /
&THCP XYZ= 21.0, 15.0, 12.0,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_ex_X21_Y15_Z12' /
&THCP XYZ= 17.0, 15.0, 15.0,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_ex_X17_Y15_Z15' /
&THCP XYZ= 19.0, 15.0, 15.0,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_ex_X19_Y15_Z15' /
&THCP XYZ= 21.0, 15.0, 15.0,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_ex_X21_Y15_Z15' /
&THCP XYZ= 17.0, 18.0, 2.0,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_ex_X17_Y18_Z2' /
&THCP XYZ= 19.0, 18.0, 2.0,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_ex_X19_Y18_Z2' /
&THCP XYZ= 21.0, 18.0, 2.0,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_ex_X21_Y18_Z2' /

&THCP XYZ= 17.0, 18.0, 5.0,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_ex_X17_Y15_Z5' /
&THCP XYZ= 19.0, 18.0, 5.0,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_ex_X19_Y15_Z5' /
&THCP XYZ= 21.0, 18.0, 5.0,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_ex_X21_Y15_Z5' /
&THCP XYZ= 17.0, 18.0, 8.0,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_ex_X17_Y15_Z8' /
&THCP XYZ= 19.0, 18.0, 8.0,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_ex_X19_Y15_Z8' /
&THCP XYZ= 21.0, 18.0, 8.0,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_ex_X21_Y15_Z8' /
&THCP XYZ= 17.0, 18.0, 12.0,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_ex_X17_Y15_Z12' /
&THCP XYZ= 19.0, 18.0, 12.0,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_ex_X19_Y15_Z12' /
&THCP XYZ= 21.0, 18.0, 12.0,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_ex_X21_Y15_Z12' /
&THCP XYZ= 17.0, 18.0, 15.0,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_ex_X17_Y15_Z15' /
&THCP XYZ= 19.0, 18.0, 15.0,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_ex_X19_Y15_Z15' /
&THCP XYZ= 21.0, 18.0, 15.0,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_ex_X21_Y15_Z15' /

\*\*\*\*\* TEMPERATURAS DE LA LLAMA \*\*\*\*\*

&THCP XYZ= 14.0, 12.0, 10.25,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_f_Y12_Z10.25' /
&THCP XYZ= 14.0, 14.0, 10.25,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_f_Y14_Z10.25' /
&THCP XYZ= 14.0, 16.0, 10.25,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_f_Y16_Z10.25' /
&THCP XYZ= 14.0, 18.0, 10.25,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_f_Y18_Z10.25' /
&THCP XYZ= 14.0, 12.0, 6.00,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_f_Y12_Z10.25' /
&THCP XYZ= 14.0, 14.0, 10.25,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_f_Y14_Z10.25' /
&THCP XYZ= 14.0, 16.0, 10.25,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_f_Y16_Z10.25' /
&THCP XYZ= 14.0, 18.0, 10.25,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_f_Y18_Z10.25' /

\*\*\*\*\* TEMPERATURAS DEL INTERIOR DEL EDIFICIO ELÉCTRICO \*\*\*\*\*

&THCP XYZ= 26.0, 5.0, 3.0,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_EE_X26_Y5_Z3' /
&THCP XYZ= 26.0, 5.0, 10.0,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_EE_X26_Y5_Z10' /
&THCP XYZ= 26.0, 5.0, 17.0,	QUANTITY='TEMPERATURE'	LABEL='T_EE_X26_Y5_Z17' /

\*\*\*\*\* TEMPERATURAS SUPERFICIALES DE LAS BARRAS DE FASE AISLADAS \*\*\*\*\*

&THCP XYZ= 12.0, 7.0, 12.0,	QUANTITY='WALL_TEMPERATURE'	LABEL='T_BF1_inf_X12'	IOR=-3 /
&THCP XYZ= 12.0, 9.5, 12.0,	QUANTITY='WALL_TEMPERATURE'	LABEL='T_BF2_inf_X12'	IOR=-3 /
&THCP XYZ= 12.0, 12.5, 12.0,	QUANTITY='WALL_TEMPERATURE'	LABEL='T_BF3_inf_X12'	IOR=-3 /
&THCP XYZ= 12.0, 7.5, 12.5,	QUANTITY='WALL_TEMPERATURE'	LABEL='T_BF1_lat_X12'	IOR=2 /
&THCP XYZ= 12.0, 10.0, 12.5,	QUANTITY='WALL_TEMPERATURE'	LABEL='T_BF2_lat_X12'	IOR=2 /
&THCP XYZ= 12.0, 13.0, 12.5,	QUANTITY='WALL_TEMPERATURE'	LABEL='T_BF3_lat_X12'	IOR=2 /
&THCP XYZ= 12.0, 7.0, 13.0,	QUANTITY='WALL_TEMPERATURE'	LABEL='T_BF1_sup_X12'	IOR=3 /
&THCP XYZ= 12.0, 9.5, 13.0,	QUANTITY='WALL_TEMPERATURE'	LABEL='T_BF2_sup_X12'	IOR=3 /
&THCP XYZ= 12.0, 12.5, 13.0,	QUANTITY='WALL_TEMPERATURE'	LABEL='T_BF3_sup_X12'	IOR=3 /

&THCP XYZ= 15.0, 7.0, 12.0,	QUANTITY='WALL_TEMPERATURE'	LABEL='T_BF1_inf_X15'	IOR=-3 /
&THCP XYZ= 15.0, 9.5, 12.0,	QUANTITY='WALL_TEMPERATURE'	LABEL='T_BF2_inf_X15'	IOR=-3 /
&THCP XYZ= 15.0, 12.5, 12.0,	QUANTITY='WALL_TEMPERATURE'	LABEL='T_BF3_inf_X15'	IOR=-3 /
&THCP XYZ= 15.0, 7.5, 12.5,	QUANTITY='WALL_TEMPERATURE'	LABEL='T_BF1_lat_X15'	IOR=2 /
&THCP XYZ= 15.0, 10.0, 12.5,	QUANTITY='WALL_TEMPERATURE'	LABEL='T_BF2_lat_X15'	IOR=2 /
&THCP XYZ= 15.0, 13.0, 12.5,	QUANTITY='WALL_TEMPERATURE'	LABEL='T_BF3_lat_X15'	IOR=2 /
&THCP XYZ= 15.0, 7.0, 13.0,	QUANTITY='WALL_TEMPERATURE'	LABEL='T_BF1_sup_X15'	IOR=3 /
&THCP XYZ= 15.0, 9.5, 13.0,	QUANTITY='WALL_TEMPERATURE'	LABEL='T_BF2_sup_X15'	IOR=3 /
&THCP XYZ= 15.0, 12.5, 13.0,	QUANTITY='WALL_TEMPERATURE'	LABEL='T_BF3_sup_X15'	IOR=3 /
&THCP XYZ= 21.0, 16.0, 12.0,	QUANTITY='WALL_TEMPERATURE'	LABEL='T_BF1_inf_Y16'	IOR=-3 /
&THCP XYZ= 18.5, 16.0, 12.0,	QUANTITY='WALL_TEMPERATURE'	LABEL='T_BF2_inf_Y16'	IOR=-3 /
&THCP XYZ= 16.0, 16.0, 12.0,	QUANTITY='WALL_TEMPERATURE'	LABEL='T_BF3_inf_Y16'	IOR=-3 /
&THCP XYZ= 20.5, 16.0, 12.5,	QUANTITY='WALL_TEMPERATURE'	LABEL='T_BF1_lat_Y16'	IOR=-1 /
&THCP XYZ= 18.0, 16.0, 12.5,	QUANTITY='WALL_TEMPERATURE'	LABEL='T_BF2_lat_Y16'	IOR=-1 /
&THCP XYZ= 15.5, 16.0, 12.5,	QUANTITY='WALL_TEMPERATURE'	LABEL='T_BF3_lat_Y16'	IOR=-1 /
&THCP XYZ= 21.0, 16.0, 13.0,	QUANTITY='WALL_TEMPERATURE'	LABEL='T_BF1_sup_Y16'	IOR=3 /
&THCP XYZ= 18.5, 16.0, 12.0,	QUANTITY='WALL_TEMPERATURE'	LABEL='T_BF2_sup_Y16'	IOR=3 /
&THCP XYZ= 16.0, 16.0, 13.0,	QUANTITY='WALL_TEMPERATURE'	LABEL='T_BF3_sup_Y16'	IOR=3 /

## \*\*\*\*\* VELOCIDADES EN LAS REJILLAS DE VENTILACIÓN \*\*\*\*\*

&THCP XYZ= 23.5, 4.0, 1.0,	QUANTITY='VELOCITY'	LABEL='V_R_Y4_Z1'	IOR=1 /
&THCP XYZ= 23.5, 4.0, 8.5,	QUANTITY='VELOCITY'	LABEL='V_R_Y4_Z7'	IOR=1 /
&THCP XYZ= 23.5, 4.0, 15.5,	QUANTITY='VELOCITY'	LABEL='V_R_Y4_Z14'	IOR=1 /
&THCP XYZ= 23.5, 10.0, 1.0,	QUANTITY='VELOCITY'	LABEL='V_R_Y4_Z1'	IOR=1 /
&THCP XYZ= 23.5, 10.0, 8.5,	QUANTITY='VELOCITY'	LABEL='V_R_Y4_Z7'	IOR=1 /
&THCP XYZ= 23.5, 10.0, 15.5,	QUANTITY='VELOCITY'	LABEL='V_R_Y4_Z14'	IOR=1 /

## \*\*\*\*\* CONCENTRACIONES DE GASES EN LAS REJILLAS DE VENTILACIÓN \*\*\*\*\*

### \*\*\*\*\* OXIGENO \*\*\*\*\*

&THCP XYZ= 23.5, 4.0, 1.0,	QUANTITY='oxygen'	LABEL='O2_R_Y4_Z1'	IOR=1 /
&THCP XYZ= 23.5, 4.0, 8.5,	QUANTITY='oxygen'	LABEL='O2_R_Y4_Z7'	IOR=1 /
&THCP XYZ= 23.5, 4.0, 15.5,	QUANTITY='oxygen'	LABEL='O2_R_Y4_Z14'	IOR=1 /
&THCP XYZ= 23.5, 10.0, 1.0,	QUANTITY='oxygen'	LABEL='O2_R_Y4_Z1'	IOR=1 /
&THCP XYZ= 23.5, 10.0, 8.5,	QUANTITY='oxygen'	LABEL='O2_R_Y4_Z7'	IOR=1 /
&THCP XYZ= 23.5, 10.0, 15.5,	QUANTITY='oxygen'	LABEL='O2_R_Y4_Z14'	IOR=1 /

\*\*\*\*\* CO2 \*\*\*\*\*

&THCP XYZ= 23.5, 4.0, 1.0,	QUANTITY='carbon dioxide'	LABEL='CO2_R_Y4_Z1'	IOR=1 /
&THCP XYZ= 23.5, 4.0, 8.5,	QUANTITY='carbon dioxide'	LABEL='CO2_R_Y4_Z7'	IOR=1 /
&THCP XYZ= 23.5, 4.0, 15.5,	QUANTITY='carbon dioxide'	LABEL='CO2_R_Y4_Z14'	IOR=1 /
&THCP XYZ= 23.5, 10.0, 1.0,	QUANTITY='carbon dioxide'	LABEL='CO2_R_Y4_Z1'	IOR=1 /
&THCP XYZ= 23.5, 10.0, 8.5,	QUANTITY='carbon dioxide'	LABEL='CO2_R_Y4_Z7'	IOR=1 /
&THCP XYZ= 23.5, 10.0, 15.5,	QUANTITY='carbon dioxide'	LABEL='CO2_R_Y4_Z14'	IOR=1 /

\*\*\*\*\* CO \*\*\*\*\*

&THCP XYZ= 23.5, 4.0, 1.0,	QUANTITY='carbon monoxide'	LABEL='CO_R_Y4_Z1'	IOR=1 /
&THCP XYZ= 23.5, 4.0, 8.5,	QUANTITY='carbon monoxide'	LABEL='CO_R_Y4_Z7'	IOR=1 /
&THCP XYZ= 23.5, 4.0, 15.5,	QUANTITY='carbon monoxide'	LABEL='CO_R_Y4_Z14'	IOR=1 /
&THCP XYZ= 23.5, 10.0, 1.0,	QUANTITY='carbon monoxide'	LABEL='CO_R_Y4_Z1'	IOR=1 /
&THCP XYZ= 23.5, 10.0, 8.5,	QUANTITY='carbon monoxide'	LABEL='CO_R_Y4_Z7'	IOR=1 /
&THCP XYZ= 23.5, 10.0, 15.5,	QUANTITY='carbon monoxide'	LABEL='CO_R_Y4_Z14'	IOR=1 /

\*\*\*\*\* VELOCIDADES DE LOS GASES DE LA LLAMA \*\*\*\*\*

&THCP XYZ= 13.5, 13.5, 1.0,	QUANTITY='VELOCITY'	LABEL='V_F_X13.5_Y13.5_Z1'	IOR=3 /
&THCP XYZ= 13.5, 13.5, 3.0,	QUANTITY='VELOCITY'	LABEL='V_F_X13.5_Y13.5_Z3'	IOR=3 /
&THCP XYZ= 13.5, 13.5, 5.0,	QUANTITY='VELOCITY'	LABEL='V_F_X13.5_Y13.5_Z5'	IOR=3 /
&THCP XYZ= 13.5, 13.5, 7.0,	QUANTITY='VELOCITY'	LABEL='V_F_X13.5_Y13.5_Z7'	IOR=3 /
&THCP XYZ= 13.5, 13.5, 9.0,	QUANTITY='VELOCITY'	LABEL='V_F_X13.5_Y13.5_Z9'	IOR=3 /
&THCP XYZ= 13.5, 13.5, 11.0,	QUANTITY='VELOCITY'	LABEL='V_F_X13.5_Y13.5_Z11'	IOR=3 /
&THCP XYZ= 13.5, 13.5, 13.0,	QUANTITY='VELOCITY'	LABEL='V_F_X13.5_Y13.5_Z13'	IOR=3 /
&THCP XYZ= 13.5, 13.5, 15.0,	QUANTITY='VELOCITY'	LABEL='V_F_X13.5_Y13.5_Z15'	IOR=3 /
&THCP XYZ= 13.5, 13.5, 17.0,	QUANTITY='VELOCITY'	LABEL='V_F_X13.5_Y13.5_Z17'	IOR=3 /
&THCP XYZ= 13.5, 13.5, 19.0,	QUANTITY='VELOCITY'	LABEL='V_F_X13.5_Y13.5_Z19'	IOR=3 /
&THCP XYZ= 13.5, 13.5, 21.0,	QUANTITY='VELOCITY'	LABEL='V_F_X13.5_Y13.5_Z21'	IOR=3 /
&THCP XYZ= 13.5, 13.5, 23.0,	QUANTITY='VELOCITY'	LABEL='V_F_X13.5_Y13.5_Z23'	IOR=3 /
&THCP XYZ= 13.5, 13.5, 25.0,	QUANTITY='VELOCITY'	LABEL='V_F_X13.5_Y13.5_Z25'	IOR=3 /
&THCP XYZ= 13.5, 13.5, 27.0,	QUANTITY='VELOCITY'	LABEL='V_F_X13.5_Y13.5_Z27'	IOR=3 /
&THCP XYZ= 13.5, 13.5, 29.0,	QUANTITY='VELOCITY'	LABEL='V_F_X13.5_Y13.5_Z29'	IOR=3 /



## ANEXO II - Manual Rápido de Utilización de FDS versión 4.0.6

<b>1. Introducción</b>	<b>i</b>
<b>2. Objetivos</b>	<b>ii</b>
<b>3. Descripción del fichero de entrada</b>	<b>iii</b>
<b>3.1. Cabecera</b>	<b>iii</b>
<b>3.2. Mallado numérico</b>	<b>iv</b>
<b>3.3. Parámetros globales – Grupo MISC</b>	<b>v</b>
<b>3.4. Descripción del entorno y del fuego</b>	<b>vii</b>
<b>3.5. Partículas Lagrangianas – Grupo PART</b>	<b>xix</b>
<b>3.6. Rociadores y detectores</b>	<b>xxi</b>
<b>3.7. Ficheros de salida</b>	<b>xxv</b>
<b>3.8. Funciones especiales</b>	<b>xxx</b>
<b>Apéndice – Tablas de parámetros de entrada</b>	<b>xxxvi</b>





## 1. Introducción

Esta guía pretende familiarizar al lector, de forma sencilla e intuitiva, con el código del **Fire Dynamics Simulator Version 4 (FDS V.4.0.6)**, creado por el *National Institute of Standards and Technology (NIST)*.

Esta herramienta se engloba dentro de los modelos de campo, “Computacional Fluid Dynamics” (*CFD*). **FDS** es actualmente uno de los modelos de CFD más avanzados para simulación de incendios. FDS computa la temperatura, la densidad, la presión, la velocidad y la composición química en cada celda de la malla en cada paso de tiempo discreto. Es capaz de computar temperatura, flujo de calor, tasa de pérdida de masa, etc. en superficies sólidas.

Las diferencias principales de esta versión de FDS con sus versiones anteriores son la mejora en la velocidad de cálculo, posibilidad de introducir detectores de humo en locales, mejora en el manejo de sustancias inflamables, capacidad de aumentar las propiedades de los elementos combustibles, etc.

Este modelo resuelve numéricamente una forma de ecuaciones de Navier-Stokes apropiadas para baja velocidad, flujo térmico, con un especial énfasis en el humo y en el transporte de calor por el fuego. Las derivadas parciales de las ecuaciones para la conservación de la masa, del momento y la energía se aproximan por diferencias finitas, y la solución se actualiza en una malla rectilínea de 3 dimensiones.

Todos los parámetros requeridos por el FDS para describir un escenario particular son introducidos en el programa mediante archivos de texto. Estos archivos contienen información sobre la malla, condiciones ambientales, geometría del recinto, propiedades de materiales, cinética de la combustión y los resultados que se desean obtener.

### 2. Objetivo

Esta guía contiene toda la información necesaria para realizar simulaciones de incendios sin profundizar en los conceptos y la teoría fundamental que subyacen bajo su modelo.

Si se desea un conocimiento mas profundo de las hipótesis y ecuaciones en las que se basa FDS, se puede encontrar información más detallada McGrattan (2004).

El objetivo de esta guía es permitir describir, mediante el código de FDS, los elementos que continuación se muestran:

- ✓ Geometrías 3D mediante polígonos
- ✓ Condiciones ambientales. Se pueden realizar modelizaciones en espacios al aire libre teniendo en cuenta la altura, la cual modifica las condiciones del incendio
- ✓ Materiales
- ✓ Reacciones de combustión
- ✓ Rociadores de agua
- ✓ Ventilación natural y ventilación forzada
- ✓ Detectores de calor y humo
- ✓ Descarga de gases en los locales mediante ventilaciones
- ✓ Parámetros de radiación

### 3. Descripción del fichero de entrada en FDS

#### 3.1. Cabecera

Está compuesta por el nombre del proyecto y el tiempo de simulación.

##### 3.1.1. Nombre del proyecto: Grupo HEAD

El grupo HEAD contiene dos parámetros: CHID y TITLE

- ✓ CHID es el nombre que el programa va a dar a todos los ficheros que genera. Para que se pueda asociar fácilmente al fichero de entrada es recomendable nombrarle de igual forma, “CHID.data”. CHID no puede contener espacios ni tabulaciones.
- ✓ TITLE es una palabra o frase que se da para describir el proyecto.
  - Ej: &HEAD CHID='Oficinas', TITLE='Incendio en papelera de Oficina A' /

##### 3.1.2. Tiempo de simulación: Grupo TIME

La línea “TIME” permite fijar parámetros tales como el tiempo que durará la simulación, el paso del tiempo, etc.

Por medio del parámetro “TWFIN” (Tiempo para la finalización), se fija el tiempo que durará la simulación.

- Ej: &TIME TWFIN=20.0 /

En los pasos iniciales de la modelización, cuando se está definiendo geometría, posicionando los puntos de medida, etc. es útil fijar un tiempo 0 para comprobar (en el visualizador, Smokeview) que la salida del programa responde a lo que se ha querido modelizar, y de esta forma depurar posibles errores en las primeras fases de la modelización.

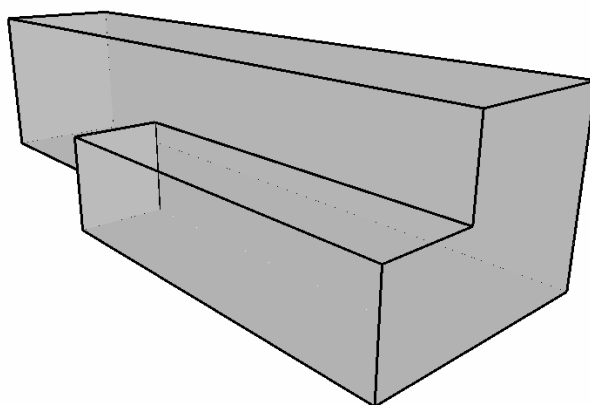
### **3.2. Mallado numérico**

Todos los cálculos que realiza FDS necesitan de un dominio con un mallado rectangular. Todos los elementos como muros, puertas, ventilaciones, mobiliario, etc., tienen que formarse a partir de dicho mallado.

#### **3.2.1. Definición del dominio computacional: Grupo PDIM**

PDIM establece las dimensiones físicas del recinto. Dichas dimensiones se originarán por medio de 6 coordenadas. Tres de ellas (XBAR0, YBAR0, ZBAR0) son tomadas por defecto (0, 0, 0) a menos que se especifique un valor. El punto opuesto (fijado por las coordenadas XBAR, YBAR y ZBAR) permitirá definir el tamaño del paralelepípedo y por tanto el escenario estudiado.

Si se desea un dominio computacional más complejo, se puede crear a partir de la composición de varios prismas.



*Figura 1: Ejemplo de dominio formado por dos prismas rectangulares.*

#### **3.2.2. Establecimiento del tamaño de las celdas: Grupo GRID**

GRID es la línea que permite especificar cuantas celdas hay en cada dirección, y por tanto el tamaño de celda del mallado. El número de celdas se especifican en las direcciones de los ejes coordenados X, Y y Z, y que se corresponden con IBAR, JBAR y KBAR.

- Ej: &GRID IBAR=96, JBAR=48, KBAR=24, /

&PDIM XBAR=9.6, YBAR=4.8, ZBAR=2.4 /

Por lo tanto, en este ejemplo se considera un dominio comprendido entre las coordenadas 0 y 9.6 en dirección x, 0 y 4.8 en dirección y, y 0 y 2.4 en dirección z. El número de celdas que hay en cada dirección son 96, 48 y 24 en las direcciones x, y, z. Las cotas se dan en metros.

Las dimensiones de las celdas del mallado tienen que poder factorizarse, siguiendo la siguiente formula:  $2^l \cdot 3^m \cdot 5^n$ . Donde  $l$ ,  $m$  y  $n$  son números enteros, incluyendo el cero.

Existe la posibilidad de poner más de un mallado en un mismo dominio, si se solapan, FDS tomará para esa zona el mallado mas fino (será el predominante). Se debe evitar que los puntos y planes de medición, THCP y SLCF respectivamente estén localizados en los límites de un mallado a otro.

También es conveniente evitar superficies de tipo VENT y el/los foco(s) del incendio se encuentren en el límite de dos mallados distintos.

### 3.3. Parámetros globales: Grupo MISC

En la línea MISC se contiene a un grupo muy diverso de parámetros de entrada. Solo debe haber una única línea de MISC en el fichero de entrada. Los parámetros más importantes en este grupo son:

- **DATABASE\_DIRECTORY:** Cadena de caracteres que indica la ruta del fichero donde se encuentra la base de datos del programa (la cual contiene información sobre superficies de materiales y parámetros de reacción para distintos combustibles).

- Ej: &MISC SURF\_DEFAULT='STEEL',  
DATABASE='c:\nist\fds\database4\database4.data' /

En ocasiones se querrán materializar materiales que no están presentes en la base de datos suministrada por el FDS, en ese caso dichos materiales (junto con sus respectivas propiedades) tienen que incluirse en el código fuente del programa.

Adicionalmente hay archivos que contienen el código que permite caracterizar los rociadores (archivos con extensión .spk) a los cuales se tendrá que hacer referencia en el código fuente en caso de que se modelicen.

- **SURF\_DEFAULT:** Indica que material será considerada por defecto, de forma que se tomará las propiedades asociadas a ese material para caracterizar los objetos cuyas superficies no se hayan especificado en el código fuente. El programa toma como superficie por defecto “INERT”.
- **REACTION:** Indica el tipo de reacción que se tomará por defecto, y que está caracterizada por los parámetros REAC. Por defecto se toma la reacción del propano (“PROPANE”).
- **TMPA:** La temperatura ambiente dentro del dominio computacional en °C se especifica por medio de este parámetro. Si no se especifica otra, el FDS toma por defecto 20°C.
- **U0, V0 y W0:** Indica los valores iniciales de las componentes de velocidad en los 3 ejes. Una aplicación usual es para establecer una corriente de aire inicial por el dominio. Por defecto se toma una velocidad de 0 m/s en las tres componentes.
- **TMPO:** La temperatura ambiente fuera del dominio computacional en °C se especifica por medio de este parámetro. Si no se especifica otra, el FDS toma por defecto 20 °C

Las temperaturas dentro y fuera del recinto, (TMPA/ TMPO), no tienen por qué ser iguales. Esto permite tener en cuenta transmisión de calor a través de los límites del recinto.

- Ej: &MISC SURF\_DEFAULT='CONCRETE',  
          TMPA=35/                    TMPO=10 /

- **NFRAMES:** Numero de volcados de salida por calculo. Los datos de termopares, planos animados, partículas y magnitudes animadas se graban cada TWFIN/NFRAMES a no ser que se especifique con DTSAM en las líneas THCP, SLCF y BNDF. (Por defecto 1000 volcados por cálculo)

- **DTPAR:** Incremento de tiempo, en segundos, entre apariciones de partículas Lagrangianas. Por defecto aparecen cada 0.05 s.
- **DTSPAR:** Incremento de tiempo en segundos entre apariciones de gotas en los rociadores. Por defecto aparecen cada 0.05 s.
- **DTSAM PART:** Incremento de tiempo entre volcados de datos de partículas trazadoras (y gotas de rociadores) en segundos. Estos volcados se añaden a un fichero llamado CHID.part que puede ser usado para realizar una animación del campo caudal. (Por defecto TWFIN/NFRAMES).
- **NPPS:** Número de partículas. El número máximo de partículas que pueden crearse en el fichero CHID.part cada DTSAM segundos. (Por defecto 100.000).
- **MAXIMUM\_DROPLETS:** Número máximo de partículas Langragianas por malla. (Por defecto 500.000).

### 3.4. Descripción del entorno y del fuego

El escenario se define a partir de geometrías rectangulares que pueden calentarse, arder, conducir calor, etc.; de venteos que pueden extraer o impulsar aire, y superficies con propiedades asociadas a ellas que caractericen los combustibles origen del incendio. El fuego es solo un tipo de condición de contorno.

#### 3.4.1. Condiciones de contorno: Grupo SURF

Mediante la línea SURF se definen las condiciones de contorno de todas las superficies/aperturas dentro o en el límite del dominio.

El comando SURF es utilizado en las líneas OBST y VENT. Así en cada una de ellas la cadena de caracteres SURF\_ID='....' indica la las condiciones de contorno que se le han dado a la superficies que conforman ese objeto.

Los parámetros que se detallan a continuación se ven afectados por la línea SURF.

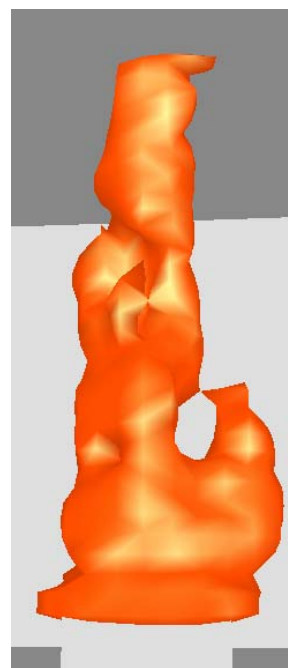
**Fuego:** Dentro del grupo SURF se utilizan una serie de parámetros para definir el fuego como una aproximación a un modelo de fracción de mezcla. Estos parámetros son:

- **HRRPUA:** Heat Release Rate Per Unit Area ( $\text{kW/m}^2$ ). Indica la energía generada en la reacción de combustión por unidad de área, o en otras palabras, la magnitud del incendio.

Se utiliza para controlar la tasa de quemado de combustible.

- Ej: &SURF ID='FIRE', HRRPUA=500. /

Desprende  $500 \text{ kW/m}^2$  en las superficies consideradas con el atributo SURF ID='FIRE'.



*Figura 2: Representación de HRRPUA con Smoke View*

- **HEAT\_OF\_VAPORIZATION ( $\text{kJ/kg}$ ):** Es la alternativa a HRRPUA. Indica la cantidad de energía requerida para evaporar un combustible sólido o líquido una vez que ha alcanzado su temperatura de ignición TMPIGN.

Valores bajos de esta propiedad hará que se gaste menos energía en producirse el incendio.

- **TMPIGN:** Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) a la que comienza a arder el material. Se debería complementar este parámetro con HRRPUA o HEAT\_OF\_VAPORIZATION. Por defecto TMPIGN es  $5000^{\circ}\text{C}$ .

Bajas temperaturas de ignición permiten que los materiales entren en ignición más fácilmente, al tener que producirse un menor aumento de su temperatura superficial hasta alcanzar ese valor límite. Lo contrario ocurre con temperaturas de ignición altas. La reacción tendría lugar en función de la reacción de combustión por defecto.



- **BURN\_AWAY**: Si se desea que un objeto que está ardiendo desaparezca una vez se haya consumido se utiliza `BURN_AWAY=.TRUE.`. Aunque hay que tener en cuenta que esta opción requiere una cantidad significativa de memoria.

Si no está activado, éste arde sin que cese la combustión hasta que la concentración de oxígeno y la temperatura de los gases alcancen valores que hagan cesar el incendio.

### Condiciones térmicas de contorno:

Hay cuatro tipos:

- 1) A temperatura de la superficie del sólido constante.
- 2) Con el flujo de calor a través de la superficie del sólido constante.
- 3) Sólido térmicamente grueso.
- 4) Lámina térmicamente delgada.

Para cada condición de contorno hay que escoger **sólo** uno de estos cuatro tipos. Para una superficie de un sólido a temperatura constante, se fija la temperatura de la superficie `TMPWAL`, en °C.

Para una superficie de un sólido donde se mantiene constante el flujo de calor hay que fijar un `HEAT_FLUX` (kW/m<sup>2</sup>). Si el `HEAT_FLUX` es mayor que cero, la superficie calienta los gases que lo rodean, y si es menor que cero los enfría. El `HEAT_FLUX` puede ser calculado en función de las condiciones que se den en el recinto simulado.

Para un sólido catalogado como térmicamente grueso, se han de fijar la conductividad `KS` (W/m·K), la densidad `DENSITY` (kg/m<sup>3</sup>), el calor específico `CP` (kJ/kg/K) y el grosor del material `DELTA` (m). La conductividad y el calor específico puede depender de la temperatura, en cambio la densidad permanecerá constante.

- Ej: 

<code>&amp;SURF ID</code>	= 'CONCRETE'
<code>FYI</code>	= 'Thermally-thick material'
<code>KS</code>	= 1.0
<code>C_P</code>	= 0.88

```
DENSITY      = 2000.  
DELTA        = 0.2 /  
&SURF ID     = 'UPHOLSTERY'  
FYI          = 'Assumed thermally-thin material'  
C_DELTA_RHO  = 1.29  
BACKING      = 'INSULATED'  
TMPIGN       = 280.  
DENSITY      = 20.0  
HEAT_OF_VAPORIZATION=2500. /  
  
&SURF ID     = 'SHEET METAL'  
FYI          = 'Thermally-thin material'  
C_DELTA_RHO  = 4.7 /
```

**Condiciones de contorno de velocidad:** Estas condiciones afectan a los componentes normales y tangenciales del vector velocidad.

El componente normal de la velocidad se controla con el parámetro VEL; si es negativo, el flujo entra en el dominio computacional, y se es positivo, sale. Si en vez de la velocidad, se quiere fijar el flujo volumétrico ( $\text{m}^3/\text{s}$ ), se utiliza VOLUME\_FLUX, con el mismo criterio de signos usado con VEL.

Si se ha fijado HRRPUA o HEAT\_OF\_VAPORIZATION, no se debería fijar a su vez la velocidad.

- Ej: &SURF ID = 'BLOWER' , VEL = -1.2 , TMPWAL = 50. /

La corriente de aire con SURF ID = 'Blower' saldrá a 50 °C a 1,2 m/s hacia el dominio. Si se pusiera VEL positivo, la ventilación extraería el aire del dominio, por lo que no tendría sentido fijar el valor TMPWAL.

### **3.4.2. Parámetros de la combustión: Grupo REAC**

El grupo REAC se tiene que especificar siempre para describir la reacción de combustión ya que de ello dependen los productos de la reacción de combustión.

Una vez que los parámetros REAC están fijados, se tiene que utilizar el HRRPUA o el HEAT\_OF\_VAPORIZATION para completar la definición del fuego. Si se escoge el HRRPUA, el Heat Release Rate será constante ya que se habrá fijado un Heat Release Rate por unidad de área a una superficie de incendio que no varía.

En caso de que se fije el calor de vaporización (HEAT\_OF\_VAPORIZATION), el valor obtenido de Heat\_Release\_Rate variará de forma en función de las condiciones, (temperaturas, concentración de gases, etc.), que se produzcan en el escenario simulado.

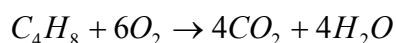
En ambos casos se utiliza un modelo de combustión de fracción de mezcla. Si se especifica el comportamiento del combustible mediante HEAT\_OF\_VAPORIZATION hay que seleccionar cuidadosamente los parámetros de la reacción o ésta no se producirá o dará lugar a resultados erróneos.

Cada modelo solo debe contener una línea REAC, que en la mayoría de los casos se selecciona de la base de datos DATABASE con el parámetro REACTION en la línea MISC. Los parámetros utilizados en con la línea REAC son:

- ID: Cadena de caracteres que dan nombre a la reacción.
- NU\_O2, NU\_H2O, NU\_FUEL, NU\_CO2: Coeficientes estequiométricos ideales para la reacción de combustión.

Si no se especifican los coeficientes estequiométricos, el valor de NU\_FUEL por defecto es 1. Para el resto son los coeficientes de la reacción de combustión del propano.

Por ejemplo, para la reacción de combustión del butileno ( $C_4H_8$ ), los coeficientes estequiométricos serían:



NU\_O2 = 6  
NU\_H2O = 4  
NU\_FUEL = 1  
NU\_CO2 = 4

- MW\_FUEL.- Peso molecular del combustible (g/mol). Por defecto, se asocia al del propano, 44 g/mol. Si el combustible contiene Nitrógeno se añade el parámetro FUEL\_N2 para indicar cuántas moléculas de nitrógeno contiene.

- Y\_O2\_INFTY.- Fracción másica de oxígeno en el ambiente. Por defecto es 0,23.
- Y\_F\_INLET.- Fracción másica de combustible en el flujo de combustible. Por defecto es 1.
- SOOT\_YIELD.- Fracción de combustible pasa a formar parte de las partículas de humo, yS. Por defecto es 0,01.
- CO\_YIELD.- Fracción de combustible que forma monóxido de carbono yCO. Por defecto se hace una correlación con la fracción carbonosa yS, por lo que normalmente no es necesario fijarlo.
- EPUMO2.-Energía por unidad de masa de oxígeno,  $\Delta H_{O2}$  (kJ/kg). Es la energía desprendida por unidad de masa de oxígeno consumido. Por defecto 13,100 (kJ/kg).
- RADIATIVE\_FRACTION.- Fracción de energía desprendida por la llama como radiación térmica.
  - Ej: &REAC ID='METHANE'  
MW\_FUEL=16  
NU\_O2=2.  
NU\_CO2=1.  
NU\_H2O=2.  
RADIATIVE\_FRACTION=0.15  
SOOT\_YIELD=0.01 /
  - Ej: &REAC ID='WOOD'  
SOOT\_YIELD = 0.01  
NU\_O2 = 3.7  
NU\_CO2 = 3.4  
NU\_H2O = 3.1  
MW\_FUEL = 87.  
EPUMO2 = 8850. /

### 3.4.3. Posicionamiento de obstáculos: Grupo OBST

OBST es el nombre de grupo que engloba todo lo referente a los volúmenes con los que se forman paredes, techos, mobiliario, etc. Cada línea OBST contiene las coordenadas de un sólido rectangular dentro del dominio. El sólido se define por dos puntos  $(x_1, y_1, z_1)$  y  $(x_2, y_2, z_2)$ , definiéndose en la línea OBST por medio de 6 coordenadas: XB = X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub>, Y<sub>1</sub>, Y<sub>2</sub>, Z<sub>1</sub>, Z<sub>2</sub>.

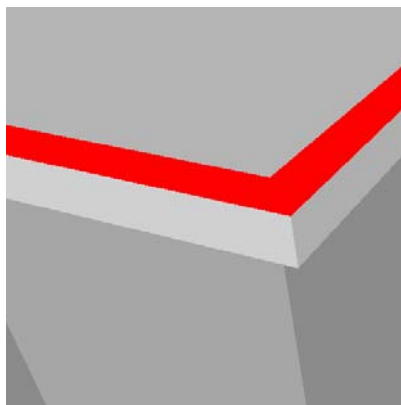
Si las condiciones de contorno no son iguales en todas las superficies de este sólido, se utiliza SURF\_IDS o SURF\_ID6. Cuando se utiliza SURF\_IDS en la línea OBST, se especifican las condiciones de contorno de las superficies: superior, laterales e inferior respectivamente.

- Ej: &SURF ID='PVC' ,HRRPUA=590.0 /  
&OBST XB = 2.3, 4.5, 1.3, 4.8, 0.0, 9.2, SURF\_IDS = 'PVC',  
'SHEET METAL','SHEET METAL' /

Superficie Superior→PVC.

Superficies Laterales→Sheet Metal.

Superficie Inferior→Sheet Metal.



**Figura 3:** Ejemplo de un sólido con distintas propiedades en sus superficies.

En caso de que se quiera definir una determinada propiedad de contorno a cada una de las caras del prisma, se utiliza SURF ID6.

- Ej: &OBST XB=2.3,4.5,1.3,4.8,0.0,9.2,  
SURF\_ID6 = 'FIRE', 'INERT', 'HOT', 'COLD', 'BLOW', 'INERT' /

Donde 'FIRE' sería la el tipo de superficie de la cara superior; 'INERT' la inferior; y 'HOT', 'COLD', 'BLOW', 'INERT' las laterales.

Si el mallado es demasiado grueso, puede que el programa asigne dos de las dimensiones de un sólido estrecho a un solo límite entre celdas de mallado. Esto provoca que este obstáculo tenga un grosor nulo. La otra alternativa es que el grosor del obstáculo sea igual al de una celda del mallado.

Una superficie sin grosor solo puede tener un vector de velocidad en su superficie, así que si se quiere total funcionalidad, conviene tener al menos el grosor de una celda del mallado.

Se puede también crear o quitar un obstáculo en momentos determinados durante la simulación, mediante los parámetros T\_CREATE o T\_REMOVE respectivamente en la línea OBST. (T\_CREATE y T\_REMOVE especifican el tiempo en segundos).

- Ej: &OBST XB = ..., SURF\_ID = ' CONCRETE', T\_CREATE = 39. /
- Ej: &OBST XB = ..., SURF\_ID = ' CONCRETE', T\_REMOVE = 39. /

Existe también la posibilidad de crear o quitar un obstáculo en función de un dispositivo sensible a la temperatura o al humo, en FDS los dispositivos HEAT y SMOD respectivamente. Para ello se añade la cadena de caracteres HEAT\_REMOVE o HEAT\_CREATE al nombre del detector y FDS creará o eliminará el obstáculo cuando estos detectores se activen.

- Ej: &OBST XB= ..., SURF\_ID = ' CONCRETE', HEAT\_REMOVE = 'det2' /
- ...
- ...
- &HEAT XYZ=..., RTI = ..., ACTIVATION\_TEMPERATURE = 87,  
    LABEL = 'det1' /
- &HEAT XYZ=..., RTI = ..., ACTIVATION\_TEMPERATURE = 110,  
    LABEL = 'det2' /

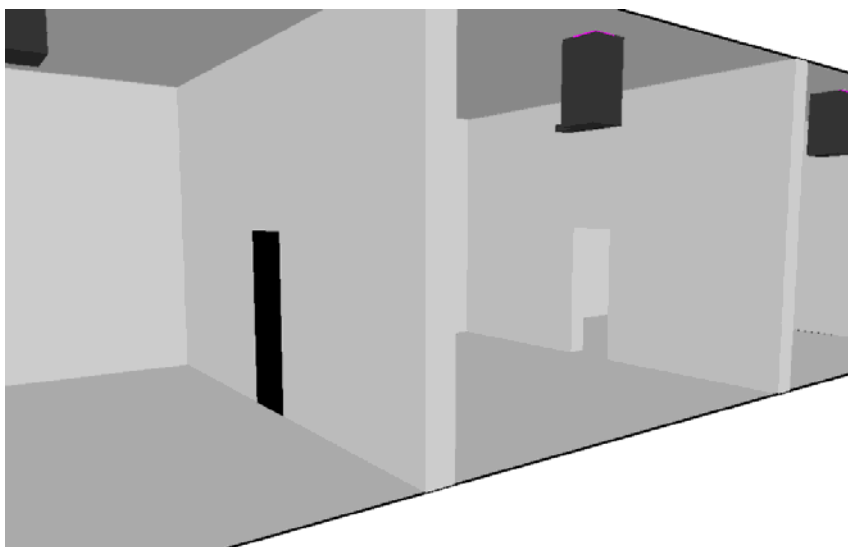
Este código eliminaría de la simulación el obstáculo cuando el detector con la etiqueta "det2" se activase. Si se especifica ALL en vez de un detector determinado

(HEAT\_REMOVE = 'ALL' o HEAT\_CREATE = 'ALL') el obstáculo sería eliminado o creado cuando cualquier detector de temperatura se activase.

#### 3.4.4. Posicionamiento de huecos: Grupo HOLE

A veces es más sencillo, a la hora de modelizar un entorno, suprimir una parte de un sólido que crearlo a base de varios obstáculos. Como en el caso de una puerta o ventana en una pared.

- Ej: &HOLE XB=2.0,4.5, 1.9,4.8, 0.0,9.2 /



*Figura 4: Ejemplo de una puerta creada con HOLE*

Si el hueco está representando una puerta o ventana, conviene hacer el grosor del hueco algo mayor al de la pared a la que se le está quitando una parte. Si la pared tuviera 0,1 metros de grosor:

- Ej:  
 &OBST XB=1.0, 1.1, 0.0, 5.0, 0.0, 3.0 /  
 Si se quisiera crear una puerta en ella, se añadiría:  
 Ej: &HOLE XB=0.99,1.11, 2.0,3.0, 0.0,2.0 /

El centímetro extra en el hueco asegura que el éste no queda encerrado dentro del obstáculo.

Al igual que con los obstáculos, se puede crear o quitar un hueco mediante los parámetros T\_CREATE o T\_REMOVE, indicando el tiempo en segundos. Existe también

la posibilidad de que éstos no dependan del tiempo para entrar en juego, sino como respuesta a un detector de temperatura. Para ello se utilizan los parámetros HEAT\_CREATE y HEAT\_REMOVE, nombrando el detector particular al que asociamos el hueco.

- Ej: &HOLE XB = 2.0, 4.5, 1.9, 4.8, 0.0, 9.2, HEAT\_CREATE = 'heat2' /  
&HEAT XYZ = 3.2, 4.4, 6.8, ACTIVATION\_TEMPERATURE = 74,  
RTI = 100., LABEL = 'heat2' /

Esto crearía un hueco cuando “heat2” se activara. Si la línea HOLE contuviera HEAT\_CREATE = 'ALL', éste se activaría con cualquier detector de temperatura que se activase.

Si se quiere evitar que un obstáculo se recorte por error por un hueco, se añadiría PERMIT\_HOLE = .FALSE. en la línea OBST.

Por último se tendrá en cuenta que HOLE no se puede utilizar en ventilaciones o superficies VENT.

### 3.4.5. Posicionamiento de superficies de ventilación: Grupo VENT

El grupo VENT se utiliza para situar planos contiguos a objetos o paredes exteriores. Para ello se utiliza el comando XB para determinar un plano, teniendo que ser dos de las seis coordenadas han de ser iguales.

Una forma fácil de hacerlo si la superficie ocupa un límite completo del dominio es mediante el parámetro CB vez de con XB. La forma de utilizarlo es igualarlo a uno los siguientes valores: 'XBAR', 'XBAR0', 'YBAR', 'YBAR0', 'ZBAR' o 'ZBAR0'. Es decir, los planos que ocuparían serían  $x = XBAR$ ,  $x = XBAR0$ ,  $y = YBAR$ ,  $y = YBAR0$ ,  $z = ZBAR$  o  $z = ZBAR0$  respectivamente.

Al igual que con OBST, las condiciones de contorno se especifican mediante SURF\_ID, para indicar a cuál de los comandos SURF asociamos la superficie de ventilación.



Hay dos palabras utilizadas en SURF\_ID que están reservados por el programa, y que se pueden usar para describir un plano VENT:

- La primera es SURF\_ID = 'OPEN', que se utiliza caracterizar una apertura pasiva hacia el exterior en el límite del dominio computacional.

Esta clase de superficie es muy útil en la modelización de exteriores evitando la acumulación de humos en el recinto de simulación.

- La segunda es SURF\_ID = 'MIRROR', que dobla en tamaño del dominio utilizando este plano espejo como plano de simetría. El flujo en el otro lado del espejo es justo el inverso. Este parámetro, al igual que OPEN, solo puede utilizarse cuando el plano está en el límite del dominio.

Cuando el plano ocupa un límite completo del dominio, es útil definirlo con el parámetro CB en lugar de con XB, como se explicó anteriormente.

Hay una excepción a poner un plano VENT en un obstáculo o en el límite del dominio. Si no se pone éste sobre ninguna superficie, puede actuar como un ventilador. Como por ejemplo:

```
&PDIM XBAR=1.0, YBAR=1.0, ZBAR=1.0 /  
      :  
      :  
&SURF ID='BLOW', VEL=2.1 /  
&VENT XB=0.50,0.50,0.25,0.75,0.25,0.75, SURF_ID='BLOW' /
```

Para determinar el sentido en que se mueven los gases, siempre en sentido normal al plano, se pone el valor de VEL positivo para el sentido positivo del eje coordenado y viceversa.

Si al simular, apareciese un error que pidiese especificar la orientación de una ventilación, conviene primero cerciorarse de que se ha descrito como un plano. Si es así, se puede especificar la orientación con el parámetro IOR. Si la dirección normal al plano es el eje  $x$  y se desea un flujo en el sentido positivo de este eje, deberá ponerse IOR = 1. Para el

sentido negativo IOR = -1, y para los ejes y y z, IOR será igual a 2/-2 o a 3/-3 respectivamente.

Otro error común, es definir el plano dentro de un sólido en vez de en su superficie, por lo que la ventilación queda “enterrada” y el programa no es capaz de determinar la dirección en la que se encuentra el plano.

Al igual que con los obstáculos o los huecos, se puede activar o desactivar una ventilación mediante los parámetros T\_OPEN o T\_CLOSE, indicando el tiempo en segundos.

- Ej: &VENT XB = ..., SURF\_ID = 'OPEN', T\_CLOSE=39. /

Existe también la posibilidad de que éstos no dependan del tiempo para entrar en juego, sino como respuesta a un detector de temperatura. Para ello se utilizan los parámetros HEAT\_OPEN, HEAT\_ACTIVATE o HEAT\_DEACTIVATE, (en función del tipo de ventilación), nombrando el detector particular al que asociamos la ventilación. Como si se abriese o cerrase una puerta o ventana como respuesta a un evento.

- Ej: &VENT XB=...,SURF\_ID='OPEN',HEAT\_OPEN='det1' /  
...  
...  
&HEAT XYZ=...,RTI=...,ACTIVATION\_TEMPERATURE=87.  
,LABEL='det1' /  
  
&HEAT XYZ=...,RTI=...,ACTIVATION\_TEMPERATURE=110.,  
LABEL='det2' /

Esto habilitaría la ventilación del tipo “open”, como una ventana, cuando “det1” se activase.

### 3.5. Partículas LAGRANGIANAS: Grupo PART

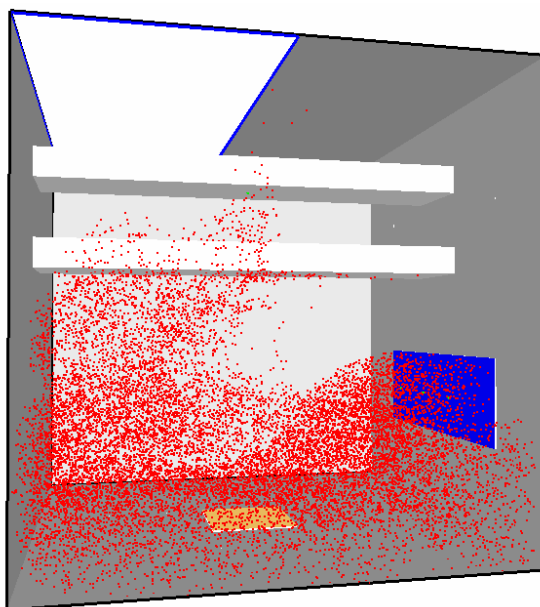
Este tipo de partículas se utilizan en FDS para representar gotas de agua, de algún combustible líquido o partículas trazadoras (que no tienen masa y se utilizan únicamente para visualizarlas con SmokeView). Algunas de estas partículas tienen masa y otras no; otras se evaporan o absorben radiación.

PART es el grupo utilizado para establecer parámetros asociados con partículas Lagrangianas. Al igual que la línea SURF contiene propiedades de la superficie de un sólido, PART las contiene sobre partículas y gotas. Una vez que se han descrito estas propiedades, aplican tal y como se muestra a continuación:

```
&PART ID='smoke',... /  
&PART ID='water',... /
```

Estas líneas pueden ser “llamadas”, por ejemplo, desde una línea SPRK para cambiar las propiedades de las gotas expulsadas por un rociador. La frecuencia con la que aparecen en el modelo puede controlarse a través del parámetro DTSPAR en la línea MISC.

Una utilización muy usual de las partículas Lagrangianas es para su visualización, considerándose que no tienen masa.



*Figura 5: Representación de partículas Lagrangianas con Smokeview*

En este caso se definirían como:

`&PART ID = 'tracers', MASSLESS = .TRUE. , ... /`

Otras opciones para partículas sin masa son:

- **QUANTITY:** Cadena de caracteres que indican qué cantidad escalar debe usarse, como el color de la partícula, `QUANTITY = 'RED'`, para que ésta sea fácilmente distinguible durante la simulación. Otras opciones son: `'TEMPERATURE'` (°C), `DIAMETER` (µm) o `'VELOCITY'` (m/s).
- **AGE:** Indica el número de segundos que la partícula o la gota va a permanecer en la simulación. Esto puede ser útil cuando tratamos de reducir el número de partículas o gotas para no inundar el dominio de ellas y hacer su visualización más fácilmente comprensible.

Para las partículas que si tienen masa, también se pueden utilizar otra serie de parámetros adicionales que pueden incluirse en la línea `PART`. Aunque hay que tener en cuenta que su uso sólo está justificado en ciertos tipos de partículas o gotas cuando son relevantes.

- **DENSITY:** La densidad la partícula sólida o líquida para las gotas.
- **VAPORIZATION\_TEMPERATURE:** Temperatura de ebullición para una gota. (Por defecto 100 °C).
- **SPECIFIC\_HEAT:** Calor específico de la gota/partícula. (Por defecto 4.184 kJ/kg/K).
- **HEAT\_OF\_VAPORIZATION:** Calor latente de vaporización de una gota líquida. (Por defecto 2259 kJ/kg).
- **DIAMETER:** Diámetro medio volumétrico de las gotas/ partículas, con una distribución que se asume como una combinación de Rosin-Rammler y Log-normal. (Por defecto 100 µm).

- FUEL: Parámetro lógico que indica si las gotas se evaporan como combustible gaseoso y arden. (Por defecto .FALSE.). Si se cambia el valor por defecto, habría que añadir también HEAT\_OF\_COMBUSTION del combustible.
- WATER: Parámetro lógico que indica si la gota se evapora como vapor de agua, pues se considera como una especie separada y automáticamente se añade al cálculo.

### 3.6. Rociadores y detectores

Para caracterizar mejor la distribución y el tamaño de las gotas atomizadas, se guarda esta información de un rociador en concreto, en un fichero *.spk*. Esos ficheros viene junto con el software de FDS, y la información que contienen proviene de los fabricantes de dichos dispositivos.

#### 3.6.1. Especificación de rociadores: Grupo SPRK

Las características de un rociador dado se almacena en su fichero correspondiente, el usuario sólo hace uso de líneas como ésta, en el archivo de trabajo *nombre\_trabajo.data*:

```
&SPRK XYZ = 3.0, 5.6, 2.3, MAKE = 'marca_rociador', LABEL = 'doorway' /
```

Las coordenadas físicas del rociador se dan por medio de tres números reales XYZ. Hay varios archivos *.spk*, para indicar cuál de ellos se ha escogido se escribe el nombre del archivo *marca\_rociador.spk* en *MAKE*. Este archivo contiene la información propia de este rociador, como sus propiedades térmicas.

La cadena *LABEL* se utiliza para describir a grandes rasgos el rociador con el fin de identificarlo fácilmente en los distintos ficheros de salida.

Existe la posibilidad de activar o desactivar los rociadores en algún punto de la simulación, poniendo T\_ACTIVATE o T\_DEACTIVATE en la línea SPRK, para indicar el tiempo de activación/desactivación en segundos. Para reorientar la dirección en la que rocía el irrigador se puede añadir en la línea SPRK el comando ORIENTATION con sus tres

coordenadas cartesianas XYZ. Su valor por defecto es (0,0,-1), para cambiarlo se variarían las coordenadas por medio de ORIENTATION:

&SPRK XYZ = 3.0, 5.6, 2.3, MAKE = 'sprinkler\_make', ORIENTATION = 1, 0, 0 /

De esta forma, el rociador apuntaría en el sentido positivo del eje x. Si se hubiese añadido WATER = .TRUE., el programa asumirá que las gotas se convertirán en vapor de agua sin explicitárselo después.

Las propiedades que puede contener el fichero *nombre.spk* son las siguientes:

- RTI: Índice de Tiempo de respuesta del catálogo del rociador en  $\sqrt{m \cdot s}$ . (Por defecto 165).

Este parámetro indica, en condiciones estándar, cómo de rápida es la respuesta. Para ello se determina el lapso de tiempo que pasa desde que los gases alcanzan la temperatura de activación y el elemento sensible actúa. Un rociador se considera rápido con un  $RTI \leq 50 \sqrt{m \cdot s}$  y normal si  $RTI \geq 80 \sqrt{m \cdot s}$ .

- ACTIVATION\_TEMPERATURE: Establece la temperatura de activación en °C. (Por defecto 74 °C).

- OPERATING\_PRESSURE: Es la presión nominal en bares. Se puede cambiar la presión de operación del rociador con la siguiente línea en el archivo de entrada:

&PIPE PRESSURE = 1.5 /

En este caso el rociador funcionará con un fluido a 1,5 bares.

- VELOCITY: Describe la distribución inicial de la velocidad de las gotas. Hay dos tipos de comandos de entrada que se pueden utilizar a continuación.

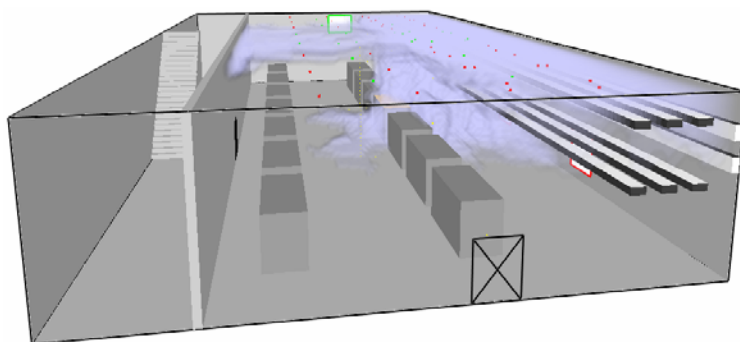
- 1) En el primer caso se establecen los valores de los parámetros: *ángulo mínimo de rociado, ángulo máximo de rociado y velocidad*. De esta forma

las gotas estarán uniformemente distribuidas formando un cono de salida según los ángulos de rociado y a la velocidad indicada.

- 2) En el segundo supuesto, el comando VELOCITY en vez de formar un cono de salida, forma una esfera alrededor del rociador de radio OFFSET\_DISTANCE.

- FLUX: Flujo másico relativo de agua ( $\text{kg}/\text{m}^2/\text{s}$ ). Se utiliza si se ha definido VELOCITY como una esfera.

Se pueden establecer retardos (adicionalmente al parámetro RTI) para ajustar el comportamiento del rociador a la realidad. Por ejemplo, en caso de un rociador que se encuentra lejos del tanque de agua o está en plantas altas de un edificio, tardará más tiempo en llegar el agua que en caso de una mayor cercanía a la fuente de suministro de agua de protección contra incendios.



*Figura 6: Representación de rociadores en acción.*

### 3.6.2. Especificación de detectores de temperatura: Grupo HEAT

El grupo HEAT se utiliza para simular detectores de temperatura y especificar sus características. Para ello se escribe en el fichero de entrada una línea de la forma:

```
&HEAT XYZ = 3.0, 5.6, 2.3, RTI = 132, ACTIVATION_TEMPERATURE = 74, LABEL = 'door' /
```

Como en el caso de los rociadores, se utilizan las tres coordenadas cartesianas para localizar el detector, por medio de tres números reales XYZ. En contra de lo que sucedía

con los sprinklers, los detectores de calor no disponen de un fichero externo con sus características, por lo que será necesario especificarlas en el fichero de entrada.

- RTI: es tiempo de respuesta en  $\sqrt{m \cdot s}$
- ACTIVATION\_TEMPERATURE: Establece la temperatura de activación en °C.  
(Por defecto 74 °C)

Hay que tener en cuenta que los detectores de temperatura pueden usarse para provocar un evento en la simulación, como la apertura de una ventilación hacia el exterior, o hacer desaparecer un obstáculo.

Para ello se hace uso del comando LABEL, para asociar los elementos que se verán afectados por el disparo del detector. Veamos el mismo ejemplo visto en el caso de los obstáculos:

- Ej: &HOLE XB = 2.0, 4.5, 1.9, 4.8, 0.0, 9.2, HEAT\_CREATE = 'heat2' /  
&HEAT XYZ = 3.2, 4.4, 6.8, ACTIVATION\_TEMPERATURE = 74,  
RTI = 100, LABEL = 'heat2' /

Esto crearía un hueco cuando “heat2” se activase. Si la línea HOLE contuviera HEAT\_CREATE = ‘ALL’, éste se activaría con cualquier detector de temperatura que se activase.

### **3.6.3. Especificación de detectores de humo: Grupo SMOD**

El grupo SMOD se utiliza para simular detectores de humo y especificar sus características. Hay dos maneras de caracterizarlos, a través de un modelo de parámetro único, HESKESTAD:

```
&SMOD XYZ = 3.0, 5.6, 2.3,  
LENGTH = 1.8,  
ACTIVATION_OBSCURATION = 1.0, LABEL='Heskestad model' /
```

O a través del modelo de cuatro parametros CLEARY:

```
&SMOD XYZ= 3.0, 5.6, 2.3,  
ALPHA_C = 1.8, BETA_C = -1.1, ALPHA_E = 0.98, BETA_E = - 0.77,  
ACTIVATION_OBSCURATION = 1.0, LABEL = 'Cleary model' /
```

Por defecto, se utiliza el modelo HESKESTAD con LENGTH = 1,8.



### 3.7. Ficheros de salida

Antes de realizar ningún cálculo, hay que considerar detenidamente qué información se quiere obtener, ya que una vez el programa está simulando, no se tiene la posibilidad de añadir más ficheros de salida. Todas las magnitudes de salida se deben especificar antes de iniciar la simulación.

Hay varias formas de visualizar los resultados de una simulación. La forma más común para los experimentadores es almacenar los valores una magnitud dada, en un punto o plano del espacio, a lo largo del tiempo. Un ejemplo podría ser una medida de temperatura con un termopar. El grupo THCP se utiliza para describir un termopar o punto de medida.

Las superficies equipotenciales animadas (ISOF) son perfiles de una magnitud escalar en tres dimensiones. Por ejemplo una superficie equipotencial a 300 °C muestra el contorno de gases que se encuentran a esta temperatura.

Para visualizar el patrón de flujo de forma más intuitiva, se puede guardar esta información en planos, tanto para fases sólidas o gaseosas. Esto se consigue con los grupos SLCF o BNDF; ambos evolucionan de forma animada con el tiempo.

Para imágenes estáticas del fluido, se utiliza el grupo PL3D. Éste formato se utiliza en muchos programas CFD como una manera sencilla de almacenar magnitudes concretas contenidas en cualquier parte del mallado en un instante de tiempo.

Por último, si se hace uso de partículas Lagrangianas provenientes de obstáculos o ventilaciones, se visualizan con SMOKEVIEW.

#### 3.7.1. Puntos de medida: Grupo THCP

Este grupo se utiliza para obtener valores de distintas magnitudes en un punto en función del tiempo, como un termopar u otro tipo de medición puntual. Cada línea THCP contiene las coordenadas del punto de medición, XYZ, y la magnitud a grabar, QUANTITY.

Esta magnitud puede ser de un material en estado gaseoso o sólido, pero si es éste último, hay que asegurarse de que la posición del punto está en su superficie y no dentro. Para localizarlo en la superficie de un sólido se puede usar el parámetro IOR indicando la orientación de la superficie.

Si la orientación es el sentido positivo del eje  $x$ , deberá ponerse  $IOR = 1$ . Para el sentido negativo  $IOR = -1$ , y para los ejes  $y$  y  $z$ ,  $IOR$  será igual a  $2/-2$  o  $3/-3$  respectivamente.

- Ej: &THCP XB = 0.3, 0.5, 2.1, 2.5, 3.0, 3.0, QUANTITY = 'MASS FLOW', LABEL = 'flujo\_masico\_puerta2' /

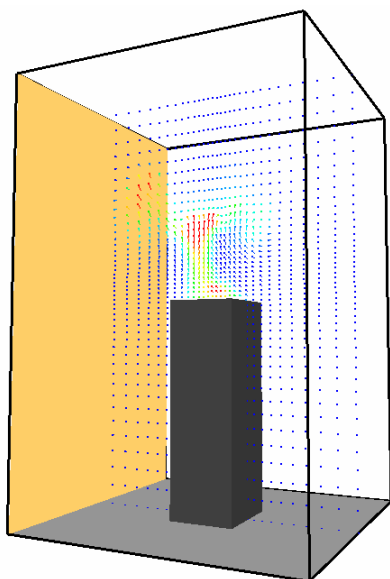
En este caso al medir un flujo se especifica un plano en vez de un punto, representado por las 6 coordenadas de XB. Se podría haber medido otra magnitud como el HRR, usado para calcular la tasa de desprendimiento de calor total dentro del dominio de simulación. Para este caso habría que definir un volumen en vez de un plano.

Hay que evitar planos o volúmenes que estén contenidos en mallados distintos. FDS tiene que decidir qué mallado utiliza en la integración, y escoge el más fino. Si éste se superpone al centro del plano o volumen y puede generar un error al asignar uno de los dos mallados.

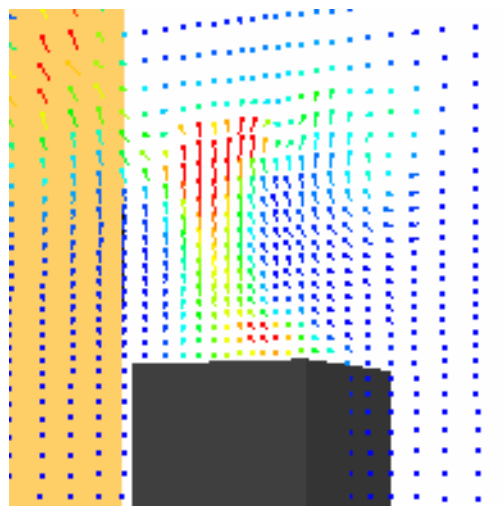
### **3.7.2. Planos animados: Grupo SLCF**

Este grupo permite almacenar valores, de distintas magnitudes de materiales en estado gaseoso. Pueden ser distintos subconjuntos del dominio computacional: una línea, un plano o un volumen en función de los valores de XB.

XB se define como en el caso de obstáculos o superficies de ventilación, definiendo 2, 4 o 6 valores para una línea, plano o volumen, respectivamente.



**Figura 7-a:** Representación de la temperatura mediante una plano SLCF



**Figura 7-b:** Detalle de la magnitud y el gradiente de la temperatura, indicada por el color y la dirección de las flechas.

### 3.7.3. Magnitudes animadas: Grupo BNDF

Este grupo permite hacer un seguimiento de magnitudes superficiales, en objetos sólidos. Las distintas magnitudes de salida aparecen en la **Tabla 2**.

Quantity	Description	Symbol	Units
DENSITY	density	$\rho$	kg/m <sup>3</sup>
TEMPERATURE	gas temperature	$T$	°C
THERMOCOUPLE	thermocouple temperature	$T_{TC}$	°C
U-VELOCITY	velocity component	$u$	m/s
V-VELOCITY	velocity component	$v$	m/s
W-VELOCITY	velocity component	$w$	m/s
VELOCITY	flow speed	$\sqrt{u^2 + v^2 + w^2}$	m/s
PRESSURE	perturbation pressure	$\tilde{p}$	Pa
H	total pressure divided by density	$H =  \mathbf{u} ^2/2 + \tilde{p}/\rho$	(m/s) <sup>2</sup>
HRRPUV	HRR Per Unit Volume	$\dot{q}'''$	kW/m <sup>3</sup>
MIXTURE_FRACTION	mixture fraction	$Z$	kg/kg
DYNAMIC_VISCOSITY	dynamic viscosity	$\mu$	kg/m/s
KINEMATIC_VISCOSITY	kinematic viscosity	$\nu = \mu/\rho$	m <sup>2</sup> /s
DIVERGENCE	divergence	$\nabla \cdot \mathbf{u}$	s <sup>-1</sup>
WMPUV	Water Mass PUV	$\dot{m}_w'''$	kg/m <sup>3</sup>
WATER_VAPOR	water vapor mass frac.	$Y_w$	kg/kg
RADIANT_INTENSITY	Integrated intensity	$\int I(\mathbf{x}, \mathbf{s}) d\Omega$	kW/m <sup>2</sup>
ABSORPTION_COEFFICIENT	Absorption coefficient	$\kappa$	1/m
oxygen	O <sub>2</sub> volume fraction	$X_{O_2}(Z)$	mol/mol
oxygen mass fraction	O <sub>2</sub> mass fraction	$Y_{O_2}(Z)$	kg/kg
fuel	fuel volume fraction	$X_F(Z)$	mol/mol
nitrogen	N <sub>2</sub> volume fraction	$X_{N_2}(Z)$	mol/mol
water vapor	H <sub>2</sub> O volume fraction	$X_{H_2O}(Z)$	mol/mol
carbon dioxide	CO <sub>2</sub> volume fraction	$X_{CO_2}(Z)$	mol/mol
carbon monoxide	CO volume fraction	$X_{CO}(Z)$	ppm
soot volume fraction	soot volume fraction	$\rho Y_s / \rho_s$	ppm
soot density	smoke particulate concentration	$\rho Y_s$	mg/m <sup>3</sup>
extinction coefficient	light extinction coef.	$K = K_m \rho Y_s$	1/m
visibility	visibility distance	$S = C/K$	m
DROPLET_FLUX_X	water mass flux in x direction	$\dot{m}_w''$ (SLCF only)	kg/m <sup>2</sup> /s
DROPLET_FLUX_Y	water mass flux in y direction	$\dot{m}_w''$ (SLCF only)	kg/m <sup>2</sup> /s
DROPLET_FLUX_Z	water mass flux in z direction	$\dot{m}_w''$ (SLCF only)	kg/m <sup>2</sup> /s

**Tabla 1:** Magnitudes de salida para fases gaseosas.  
THCP, SLCF o PL3D

Quantity	Description	Symbol	Units
RADIATIVE_FLUX	net radiative flux	$\dot{q}_r''$	kW/m <sup>2</sup>
CONVECTIVE_FLUX	convective flux into solid	$\dot{q}_c'' = h(T_g - T_w)$	kW/m <sup>2</sup>
HEAT_FLUX	net heat flux into solid	$\dot{q}_r'' + \dot{q}_c''$	kW/m <sup>2</sup>
GAUGE_HEAT_FLUX	equivalent flux to cold wall	$\dot{q}_r''/\varepsilon + \dot{q}_c'' + h(T_w - T_\infty) + \sigma(T_w^4 - T_\infty^4)$	kW/m <sup>2</sup>
INCIDENT_HEAT_FLUX	incident heat flux	$\dot{q}_r''/\varepsilon + \dot{q}_c'' + \sigma T_w^4$	kW/m <sup>2</sup>
WALL_TEMPERATURE	wall temperature	$T_w$	C
INSIDE_WALL_TEMPERATURE	inner wall temperature	$T_s(x)$	C
BURNING_RATE	mass loss rate per unit area	$\dot{m}_f''$	kg/m <sup>2</sup> /s
PRESSURE_COEFFICIENT	pressure coefficient	$C_p = (p - p_0)/(\frac{1}{2}\rho_\infty U^2)$	N/A
WMPUA	Water Mass Per Unit Area	$\dot{m}_w''$	kg/m <sup>2</sup>
WCPUA	Water Cooling Per Unit Area	$\dot{q}_w''$	kW/m <sup>2</sup>

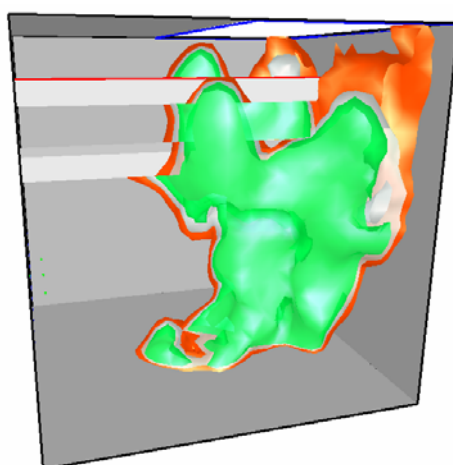
**Tabla 2:** Magnitudes de salida para fases sólidas.  
THCP o BNDF

### 3.7.4. Superficies equipotenciales animadas: Grupo ISOF

Este grupo permite guardar uno o más valores de una magnitud única en fase gaseosa y representarla como una secuencia animada. Estas magnitudes son DENSITY, TEMPERATURE, HRRPUV y MIXTURE\_FRACTION.

En el ejemplo expresado a continuación se pide tres valores diferentes de temperatura de gases con la línea:

- Ej: &ISOF QUANTITY = 'TEMPERATURE', VALUE(1)=50, VALUE(2)=200, VALUE(3)=500 /



**Figura 8:** Representación de superficies a distintas temperaturas

Cada color está relacionado con una de las temperaturas solicitadas. Dichas temperaturas están especificadas en °C. Hay que tener en cuenta que estos archivos de salida pueden ocupar mucha memoria en el disco duro.

### 3.7.5. Volcado de datos estáticos: Grupo PL3D

Este grupo se utiliza para establecer qué cantidades se van a dar como salida en el fichero Plot3D y cada cuanto tiempo. Al menos se debería poner una línea PL3D en el fichero de entrada. Hay cinco magnitudes de la **tabla 1** que se escriben en el fichero de salida, cada DTSAM segundos. Por defecto la especificación sería:

- Ej: &PL3D QUANTITIES = 'TEMPERATURE', 'U-VELOCITY', 'V-VELOCITY', 'W-VELOCITY', 'HRRPUV' /

### **3.8. Funciones especiales**

#### **3.8.1. Parada y reinicio de simulaciones**

Para reiniciar un trabajo, debe existir un archivo CHID.restart en el directorio de trabajo, además de añadir el comando RESTART = .TRUE. en el grupo MISC.

Existe la posibilidad de guardar periódicamente los archivos de reinicio, para evitar perder los cálculos ante fallos en el suministro eléctrico o colapso del sistema. Para ello basta con indicar cada cuanto tiempo de simulación se quiere guardar, con el comando DTCORE, en segundos, en la línea MISC.

- Ej: DTCORE = 50

Por defecto el valor de DTCORE es infinito, es decir, que no se crearán archivos de reinicio a no ser que se haga manualmente creando un fichero llamado CHID.stop.

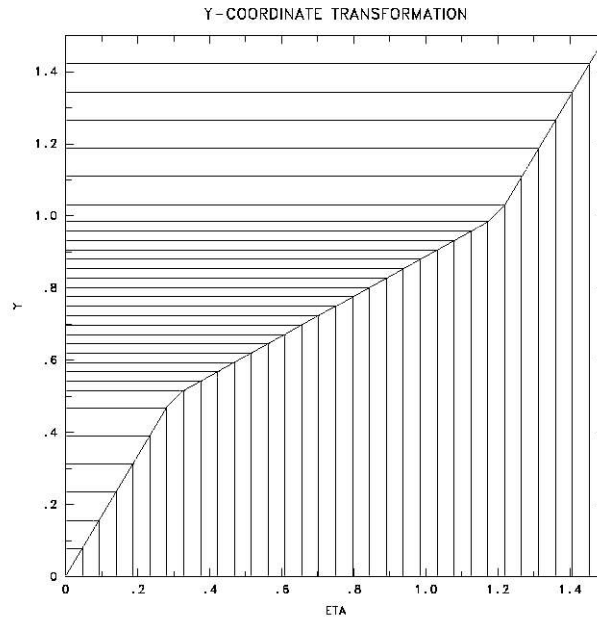
#### **3.8.2. Mallados no uniformes**

Por defecto, las celdas del mallado que forman el dominio computacional tienen un tamaño uniforme. Sin embargo se puede especificar un tamaño de celda no uniforme en una o dos de las tres coordenadas cartesianas.

Hay dos tipos de funciones de transformación que permiten el cambio de tamaño en las celdas del mallado, la más sencilla es una función lineal de ensamblado. En la **Figura 9** puede verse un ejemplo de esta función, aplicada en la coordenada  $y$ .

La gráfica muestra cómo un mallado con un espaciado uniforme ( eje horizontal) puede transformarse a uno no uniforme (eje vertical). En este caso la función conecta segmentos rectilíneos a través de puntos preestablecidos. (CC, PC). Estos puntos deberían darse en orden creciente:

- &TRNY CC = 0.30, PC = 0.50, MESH\_NUMBER = 2 /
- &TRNY CC = 1.20, PC = 1.00, MESH\_NUMBER = 2 /



**Figura 9:** Transformación lineal de ensamblado

El parámetro CC se refiere a la coordenada computacional, en este caso, en el eje horizontal y PC es la coordenada física, en el eje vertical.

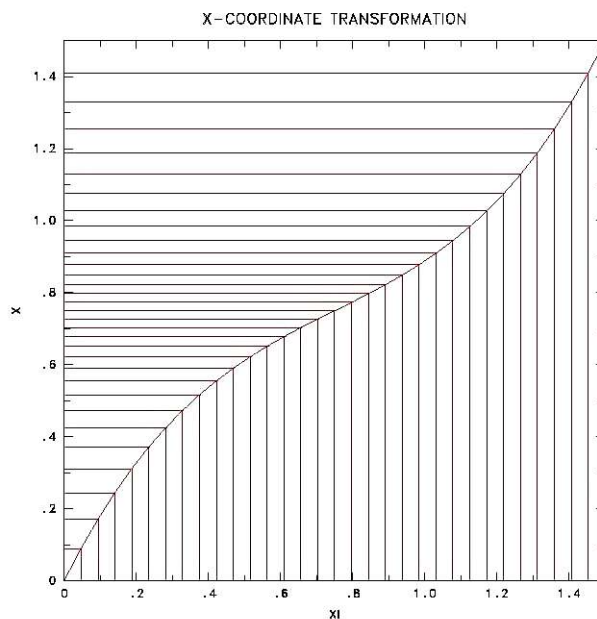
La otra función que se puede utilizar es una función polinómica del tipo:

$$\frac{d^{IDERIV} f(CC)}{d\xi^{IDERIV}} = PC$$

La **Figura 10** muestra un ejemplo de una transformación polinómica. Los parámetros utilizados en este ejemplo son:

- &TRNX IDERIV = 0, CC = 0.75, PC = 0.75, MESH\_NUMBER = 3 /
- &TRNX IDERIV = 1, CC = 0.75, PC=0.50, MESH\_NUMBER = 3 /

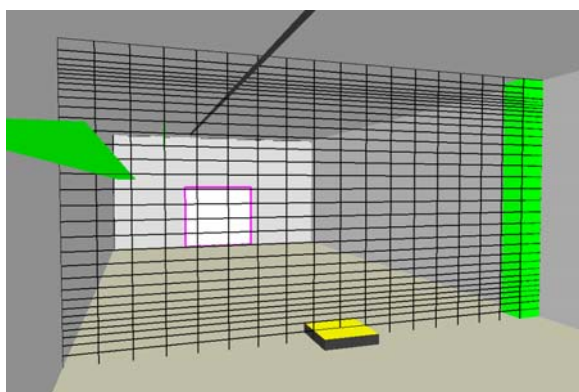
Que se corresponde con  $f(0.75) = 0.75$  y  $\frac{df}{d\xi}(0.75) = 0.5$ .



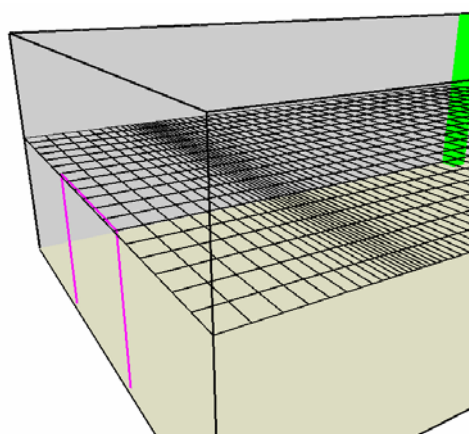
**Figura 10:** Transformación polinómica.

Los ejes vertical y horizontal de las **figuras 9 y 10** indican cómo el mallado de espaciado uniforme en el eje horizontal se transforma en uno no uniforme en el eje vertical.

La pendiente de la función de transformación indica el grado en que las celdas del mallado son estiradas (pendiente mayor que 1) o comprimidas (pendiente menor de 1).



**Figura 11:** Ejemplo de mallado no uniforme en el eje vertical



**Figura 12:** Ejemplo de mallado no uniforme en el eje horizontal



### 3.8.3. Combustión de tasa finita o de premezcla

Por defecto, FDS considera que el fuego es esencialmente una reacción infinitamente rápida entre el combustible y el oxígeno; y que ésta no depende de la temperatura de los gases adyacentes.

También asume que la zona de reacción es infinitamente delgada con combustible a un lado y oxígeno en el otro. Si se desea una reacción de tasa finita o de premezcla, hay que seguir los siguientes pasos:

1. Es muy recomendable modelar reacciones de premezcla solo cuando FDS este funcionando en modo DNS (Direct Numerical Simulation) en vez de en el modo por defecto LES (Smagorinsky form of Large Eddy Simulation). Para ello hay que añadir `DNS=.TRUE.` en la línea MISC.
2. Las especies antecedentes en la línea MISC normalmente se determinan como 'NITROGEN'.
3. El grupo SPEC se utiliza para especificar especies adicionales. Cada línea SPEC debería incluir el nombre de las especies (ID) y la fracción másica ambiental `MASS FRACTION 0`.

### 3.8.4. Fugas

Es posible modelizar fugas de gases en cálculos con FDS. Hay tres criterios que tienen que cumplir:

- 1) El límite del dominio computacional debe coincidir con las paredes que dan al exterior del compartimento.
- 2) No debe haber ventilaciones pasivas OPEN con el exterior.
- 3) Solo debe usarse un mallado.

Si se cumplen estos tres requisitos, se puede establecer un área de derrame, LEAK AREA, en la línea MISC y asignar al menos uno de los materiales de la pared con el comando `LEAKING=.TRUE.` en la línea SURF.

El programa distribuye el derrame uniformemente a las superficies de derrame. El área de derrame viene dado por la siguiente formula en m<sup>2</sup>:

$$A_L = \dot{V} \sqrt{\frac{\rho_\infty}{2(p_o - p_\infty)}}$$

Donde  $\dot{V}$  es el la proporción de flujo de gas (m<sup>3</sup>/s) a una presión dada  $p_o$ . Y  $\rho_\infty$  es la densidad ambiente (kg/m<sup>3</sup>).

### **3.8.5. Flujos y fuegos en exteriores**

Simular un incendio en exteriores no es muy diferente de hacerlo en recintos cerrados, pero hay algunos parámetros que nos ayudan a modelizarlo. Es fácil representar el viento con un incremento verosímil de su velocidad con la altura. Por defecto el perfil de velocidad en cualquier apertura está establecido, pero puede modificarse con el parámetro PROFILE en la línea SURF.

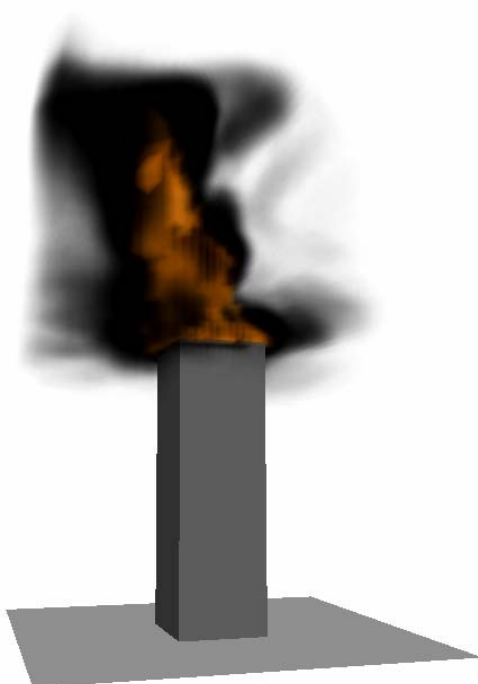
Por ejemplo PROFILE='PARABOLIC' genera un perfil parabólico, siendo VEL la máxima velocidad. 'ATMOSPHERIC' produce un perfil de viento atmosférico de la forma

$$u = u_o \left( \frac{z}{z_o} \right)^p .$$
 Si se determina un perfil atmosférico, también hay que hacerlo con  $Z_o$  y  $p$ .

VEL especifica la velocidad de referencia  $u_o$ .

Otro parámetro muy útil para simulaciones en exteriores es la tasa de descenso de temperatura en la atmósfera. Normalmente en los primeros cientos de metros de la atmósfera, la temperatura disminuye varios grados centígrados por Kilómetro. Estos pocos grados pueden ser importantes si consideramos la ascensión del humo y su enfriamiento rápido a medida que se eleva.

DT0DZ es la tasa de descenso de temperatura en °C/m. Sólo tiene sentido establecer este parámetro para cálculos exteriores donde la altura del dominio sea de decenas o centenares de metros. Su valor por defecto es 0,0097 °C/m.



*Figura 13: Ejemplo de modelado de incendios en exteriores*

**Apéndice 1.- Lista alfabética de los parámetros de entrada.**

Esta sección enumera una lista de los parámetros utilizados en FDS divididos por grupos y en orden alfabético. Esta lista puede ser muy útil para utilizarse como referencia rápida a la hora de consultar estos comandos.

BNDF (Boundary File Parameters)				
DTSAM	Real	Time increment	s	TWFIN/NFRAMES
QUANTITY	Character	Quantity to visualize		

GRID (Grid Parameters)				
IBAR	Integer	No. cells in <i>x</i> direction		10
JBAR	Integer	No. cells in <i>y</i> direction		10
KBAR	Integer	No. cells in <i>z</i> direction		10

HEAD (Header Material)				
CHID	Character	Job Identification String		'output'
TITLE	Character	Title for job		

HEAT (Heat Detectors)				
ACTIVATION_TEMPERATURE	Real	Link temperature	°C	74
LABEL	Character	Descriptor		
RTI	Real	Response Time Index	$\sqrt{\text{m s}}$	100
XYZ	Real Triplet	Coordinates	m	

HOLE (Obstruction Cutout Parameters)				
HEAT_CREATE	Character	LABEL of HEAT detector to create		
HEAT_REMOVE	Character	LABEL of HEAT detector to remove		
RGB	Real Triplet	Color indices for obstruction(s) to be cut		
T_CREATE	Real	Time to Create Hole	s	0
T_REMOVE	Real	Time to Remove Hole	s	1000000
XB	Real Sextuplet	Physical coordinates	m	

INIT (Initial Conditions)				
QUANTITY	Character	Parameter to initialize		
VALUE	Real	Initial value		
XB	Real Sextuplet	Coordinates	m	

ISO (Isosurface Parameters)				
DTSAM	Real	Time increment	s	TWFIN/NFRAMES
QUANTITY	Character	Quantity to visualize		
VALUE	Real	Contour value		

MISC (Miscellaneous Parameters)				
AUTOMATIC_Z	Logical	Flame sheet correction scheme		. TRUE .
BACKGROUND_SPECIES	Character	Background species		
BAROCLINIC	Logical	Baroclinic torque correction		. FALSE .
CSMAG	Real	Smagorinsky constant		0.20
DATABASE	Character	Name of Database file		
DATABASE_DIRECTORY	Character	Name of Database directory		
DENSITY	Real	Density of background liquid	kg/m <sup>3</sup>	
DNS	Logical	Direct Numerical Simulation		. FALSE .
DT0DZ	Real	Atmospheric temperature lapse rate	°C/m	-0.0097
DTCORE	Real	Time between core dumps	s	
DTPAR	Real	Time between particle inserts	s	0.05
DTSAM_PART	Real	Time between writes to .part file	s	
DTSPAR	Real	Time between sprinkler droplets	s	0.05
GAUGE_TEMPERATURE	Real	Temp. of Heat Flux Gauges	°C	TMPA
GVEC	Real triplet	Gravity vector	m/s <sup>2</sup>	0,0,-9.81
ISOTHERMAL	Logical	Isothermal calculation		. FALSE .
INCOMPRESSIBLE	Logical	Incompressible calculation		. FALSE .
LEAK_AREA	Real	Leakage area of sealed domain	m <sup>2</sup>	0.
MAXIMUM_DROPLETS	Integer	Max particles per mesh		500000
NFRAMES	Integer	Number of Frames of output data		1000
NPPS	Integer	Max particles per output set		100000
PR	Real	Prandtl number (LES only)		0.5
PINF	Real	Ambient pressure	Pa	101325
POROUS_FLOOR	Logical	Droplets disappear at floor		. TRUE .
RADIATION	Logical	Radiation calculation flag		. TRUE .
REACTION	Character	Combustion reaction identifier		
RESTART	Logical	Restart previous calculation		. FALSE .
SC	Real	Schmidt number (LES only)		0.5
SMOKE3D	Logical	Flag for 3D Smoke Visualization		. TRUE .
SUPPRESSION	Logical	Suppression calculation flag		. TRUE .
SURF_DEFAULT	Character	Default SURFace type		' INERT '
TEXTURE_ORIGIN	Char. Triplet	Origin of Texture Map	m	
TMPA	Real	Ambient Temperature	°C	20.
TMPO	Real	Outside Temperature	°C	20.
U0 , V0 , W0	Reals	Prevailing velocity field	m/s	0.

OBST (Obstruction Parameters)				
BNDF_BLOCK	Logical	Draw Boundary Info		. TRUE .
HEAT_CREATE	Character	LABEL of Controlling Heat Detector		
HEAT_REMOVE	Character	LABEL of Controlling Heat Detector		
COLOR	Character	Color		
OUTLINE	Logical	Draw as Outline		. FALSE .
PERMIT_HOLE	Logical	Allow a Hole		. TRUE .
RGB	Real Triplet	Color indices		
SAWTOOTH	Logical	Smooth Obstruction		. FALSE .
SURF_ID	Character	Associated Surface		
SURF_IDS	Character Triplet	Associated Surfaces (top-side-bottom)		
SURF_ID6	Character Sextuplet	Associated Surfaces (like XB		
T_CREATE	Real	Time to Create Obstruction	s	
T_REMOVE	Real	Time to Remove Obstruction	s	
TEXTURE_ORIGIN	Real Triplet	Coordinates of Texture Map		
THICKEN	Logical	No Thin Obstructions		. FALSE .
XB	Real Sextuplet	Physical coordinates	m	

PART (Lagrangian Particles/Droplets)				
AGE	Real	Droplet lifetime	s	100000
DENSITY	Real	Droplet density	kg/m <sup>3</sup>	1000
DIAMETER	Real	Median Volumetric Diameter	μm	100
DROPLETS_PER_SECOND	Integer	Drops per second per head		1000
FUEL	Logical	Liquid Fuel		. FALSE .
GAMMA_D	Real	Parameter for size distribution		2.4
HEAT_OF_COMBUSTION	Real	Heat of Combustion	kJ/kg	
HEAT_OF_VAPORIZATION	Real	Latent Heat of Vap	kJ/kg	2259
ID	Character	Identifier		
INITIAL_TEMPERATURE	Real	Initial Temperature	°C	TMPA
MASSLESS	Logical	Massless tracers		. FALSE .
MASS_PER_VOLUME	Real	Droplet mass per unit volume	kg/m <sup>3</sup>	1
MELTING_TEMPERATURE	Real	Melting Temperature	°C	0
NUMBER_INITIAL_DROPLETS	Integer	Number of droplets at start		0
QUANTITY	Character	Quantity for coloring		
SAMPLING_FACTOR	Integer	Filter for output file		1
SPEC_ID	Character	Name of gas vapor		
SPECIFIC_HEAT	Real	Droplet specific heat	kJ/kg/K	4.184
STATIC	Logical	Stationary Particles		. FALSE .
VAPORIZATION_TEMPERATURE	Real	Liquid Droplet Boiling Temp	°C	100
WATER	Logical	Water Droplet		. FALSE .

PDIM (Physical Dimensions)				
XBAR0, XBAR	Real	Limits of $x$ coordinate	m	
YBAR0, YBAR	Real	Limits of $y$ coordinate	m	
ZBAR0, ZBAR	Real	Limits of $z$ coordinate	m	
RBAR0, RBAR	Real	Limits of $r$ (cylindrical coordinates)	m	

PIPE (Sprinkler Pipe Parameters)				
DELAY	Real	Time delay after first activation	s	0
PRESSURE	Real	Pressure in sprinkler pipe	bar	

PL3D (Plot3D Parameters)				
DTSAM	Real	Time increment	s	TWFIN/5
QUANTITIES	Character Quintuplet	Name of Quantities to save		
WRITE_XYZ	Logical	Write Coordinate File		.FALSE.

RADI (Radiation Parameters)				
ANGLE_INCREMENT	Integer	Number of angles skipped per update		5
CH4_BANDS	Logical	Include extra fuel bands		.FALSE.
KAPPA0	Real	Constant absorption coefficient	1/m	0
NMIEANG	Integer	Number of polar angles		15
NUMBER_RADIATION_ANGLES	Integer	Number of solid angles		100
PATH	Real	Path length for radiation calc.	m	
RADTMP	Real	Assumed radiative source temp.	°C	900
TIME_STEP_INCREMENT	Integer	Number time steps skipped		3
WIDE_BAND_MODEL	Logical	Non-gray gas assumption		.FALSE.

RAMP (Ramping Parameters)				
F	Real	Function value		
ID	Character	Identifier		
T	Real	Time (or Temperature)	s (or °C)	

REAC (Reaction Parameters)				
BOF	Real	Pre-exponential Factor	cm <sup>3</sup> /mol/s	
CRITICAL_FLAME_TEMPERATURE	Real	Suppression criterion	°C	1427
DELTAH	Real	Heat of Combustion	kJ/kg	
E	Real	Activation Energy	kJ/kmol	
EPUMO2	Real	Energy per Unit Mass O <sub>2</sub>	kJ/kg	
FUEL	Character	Name of Fuel		
FUEL_N2	Real	N <sub>2</sub> molecules in fuel		0
ID	Character	Identifier		
MASS_EXTINCTION_COEFFICIENT	Real	Visibility parameter	m <sup>2</sup> /kg	7600
MAXIMUM_VISIBILITY	Real	Visibility parameter	m	30
MW_FUEL	Real	Molecular Weight of Fuel	g/mol	44
NU_CO2	Real	Stoich. Coefficient for CO <sub>2</sub>		3
NU_FUEL	Real	Stoich. Coefficient for Fuel		1
NU_H2O	Real	Stoich. Coefficient for Water		4
NU_O2	Real	Stoich. Coefficient for Oxygen		5
RADIATIVE_FRACTION	Real	Radiative Loss Fraction		0.35
CO_YIELD	Real	Fraction of CO from fuel		
SOOT_YIELD	Real	Fraction of soot from fuel		0.01
VISIBILITY_FACTOR	Real	Visibility parameter		3
XNO, XNF	Real	Arrhenius Exponent		
X_O2_LL	Real	Lower Oxygen Limit	mol/mol	0.15
Y_F_INLET	Real	Mass Frac. of Fuel in Burner	kg/kg	1.0
Y_O2_INFITY	Real	Ambient Oxygen Mass Frac.	kg/kg	0.23
Z_CONSTANT	Real	Mixture Frac. corrector		1.

SLCF (Slice File Parameters)				
CB	Character	Plane to save slice file		
DTSAM	Real	Time increment	s	TWFIN/5
K_HIGH	Integer	Upper K value for LAYER HEIGHT		KBAR
K_LOW	Integer	Lower K value for LAYER HEIGHT		1
MESH_NUMBER	Integer	Save only slices in this mesh		
PBX	Real	x-plane to save slice file		
PBY	Real	y-plane to save slice file		
PBZ	Real	z-plane to save slice file		
QUANTITY	Character	Name of Quantity to save		
VECTOR	Logical	Include flow vectors		. FALSE.
WRITE_XYZ	Logical	Write Coordinate File		. FALSE.
XB	Real Sextuplet	Coordinates of region to save	m	



SPEC (Species Parameters)				
DENSITY	Real	Density of Liquid Species	kg/m <sup>3</sup>	
DIFFUSION_COEFFICIENT	Real	Diffusivity $D$	m <sup>2</sup> /s	
EPSILONKLJ	Real	Leonard-Jones Parameter		0
ID	Character	Name of species		
MASS_FRACTION_0	Real	Initial mass fraction		0
MW	Real	Molecular Weight	g/mol	29
NU	Real	Stoich. coefficient		
SIGMALJ	Real	Leonard-Jones Parameter		0
THERMAL_CONDUCTIVITY	Real	Conductivity $k$	W/m/K	
VISCOSITY	Real	Dynamic Viscosity $\mu$	kg/m/s	

SPRK (Sprinkler Parameters)				
LABEL	Character	Identifying Label for output		
MAKE	Character	Name of sprinkler (.spk) file		
ORIENTATION	Real Triplet	Direction vector		0,0,-1
PART_ID	Character	Name of associated PART line		
ROTATION	Real Triplet	Rotation Angle	deg	0
T_ACTIVATE	Real	User-prescribed Activation	s	
T_DEACTIVATE	Real	User-prescribed De-Activation	s	
XYZ	Real Triplet	Physical coordinates	m	

SURF (Surface Properties)				
ADIABATIC	Logical	Adiabatic thermal BC		. FALSE .
A	Real	Pre-exponential factor	m/s	6.5E5
BACKING	Character	Back face boundary condition		' VOID '
BURN_AWAY	Logical	Remove burnt objects		. FALSE .
BURNING_RATE_MAX	Real	Maximum Burning Rate	kg/m <sup>2</sup> /s	0.1
C_DELTA_RHO	Real	Specific heat x thickness x density	kJ/m <sup>2</sup> /K	
CHAR_DENSITY	Real	Density of char	kg/m <sup>3</sup>	120.
C_P	Real	Specific heat	kJ/kg/K	
C_P_CHAR	Real	Specific heat of char	kJ/kg/K	0.7
DELTA	Real	Wall thickness	m	0.1
DENSITY	Real	Solid mass per unit volume	kg/m <sup>3</sup>	450.
E	Real	Activation energy	kJ/kmol	
E_COEFFICIENT	Real	Extinguishing coefficient	1/s	0.
EMISSIVITY	Real	Emissivity		0.9
FUEL_FRACTION	Real	Mass concentration of fuel	kg/kg	1.
HEAT_FLUX	Real	Heat flux at surface	kW/m <sup>2</sup>	0.
HEAT_OF_COMBUSTION	Real	Heat of combustion	kJ/kg	
HEAT_OF_VAPORIZATION	Real	Heat of vaporization	kJ/kg	
HRRPUA	Real	Heat Release Rate Per Unit Area	kW/m <sup>2</sup>	0.
HRRPUA_MAX	Real	Maximum HRRPUA	kW/m <sup>2</sup>	
ID	Character	Surface IDentifier		
KS	Real	Thermal conductivity	W/m/K	
KS_CHAR	Real	Thermal conductivity of char	W/m/K	0.1
LEAKING	Logical	Leakage calculation		. FALSE .
MASS_FLUX (I)	Real Array	Mass flux of species I		
MASS_FLUX_CRITICAL	Real	Mass flux at TMPTGN		0.02
MASS_FRACTION (I)	Real Array	Mass fraction of species I		
MOISTURE_FRACTION	Real	Water content by mass	kg/kg	0.
NPPC	Integer	Number of particles per cell		1
PART_ID	Character	Lagrangian Particle ID		
PHASE	Character	Phase of boundary		' SOLID '
POROSITY	Real	Porosity fraction		0.
PLE	Real	Atmospheric profile exponent		0.3
PROFILE	Character	Name of velocity profile		
RADIUS	Real	Radius of cylindrical solid	m	
RAMP_C_P	Character	Ramp ID for specific heat		
RAMP_C_P_CHAR	Character	Ramp ID for char specific heat		
RAMP_KS	Character	Ramp ID for conductivity		
RAMP_KS_CHAR	Character	Ramp ID for char conductivity		
RAMP_MF (I)	Character	Ramp ID for species I		
RAMP_Q	Character	Ramp ID for HRR		
RAMP_V	Character	Ramp ID for velocity		

SURF (Surface Properties, continued)				
RGB	Real Triplet	Color indices for surface		1.0,0.8,0.4
SURFACE.DENSITY	Real	Density $\times$ Thickness	kg/m <sup>2</sup>	
TAU_MF (I)	Real Array	Ramp-up time for species I	s	1.
TAU_Q	Real	Ramp-up time for HRR	s	1.
TAU_V	Real	Ramp-up time for velocity	s	1.
TEXTURE.HEIGHT	Real	Height of texture image	m	1.
TEXTURE.MAP	Character	Name of texture map file		
TEXTURE.WIDTH	Real	Width of texture image	m	1.
TMPIGN	Real	Ignition temperature	°C	5000.
TMPWAL	Real	Surface temperature	°C	20.
TMPWALO	Real	Initial solid temperature	°C	20.
VBC	Real	Velocity Slip Index		0.5
VEL	Real	Normal velocity	m/s	0.
VEL.T	Real Pair	Tangential velocity components	m/s	0.
VOLUME.FLUX	Real	Normal velocity $\times$ vent area	m <sup>3</sup> /s	0.
WALL.POINTS	Integer	Internal wall points		20
Z0	Real	Atmospheric profile origin	m	10.

THCP (Thermocouples and Point Measurements)				
DEPTH	Real	Depth into surface for internal wall temp.	m	0
DIAMETER	Real	Diameter of Thermocouple Bead	m	0.001
DTSAM	Real	Time increment	s	TWFIN/NFRAMES
EMISSIVITY	Real	Emissivity of Thermocouple Bead		0.85
IOR	Integer	Orientation Parameter		
K.HIGH	Integer	Upper K value for LAYER HEIGHT		KBAR
K.LOW	Integer	Lower K value for LAYER HEIGHT		1
LABEL	Character	Identifier for output		
QUANTITY	Character	Name of Quantity to save		
XB	Real Sextuplet	Coordinates of non-point measurement	m	
XYZ	Real Triplet	Coordinates of point measurement	m	

TIME (Time Parameters)				
DT	Real	Initial time step	s	
SYNCHRONIZE	Logical	Lock time step of multiple meshes		. FALSE .
TWFIN	Real	Time When FINished	s	1.

TRNX, TRNY, TRNZ (Transformation Parameters)				
CC	Real	Computational coordinate	m	
IDERIV	Integer	Order of polynomial transformation		
MESH.NUMBER	Integer	Number of mesh to transform		
PC	Real	Physical coordinate or derivative		

---

## **AGRADECIMIENTOS**

Este proyecto no hubiera sido posible realizarlo sin el apoyo de mis tutores, Guadalupe Vadillo y especialmente Víctor Amezcua. Gracias por vuestra predisposición en aclarar mis dudas y agilizarlo en la medida de lo posible.

Gracias a mis padres, Pilar y José Luis, y hermanos, Silvia, Bea y Quique por apoyarme y confiar en mí, cada uno a su manera.

Gracias a Ana, por sus palabras de ánimo cuando más las necesitaba y por seguir creyendo en nuestro verdadero proyecto.

---